

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-92444

(P2003-92444A)

(43) 公開日 平成15年3月28日 (2003.3.28)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

キーワード (参考)

H 0 1 L 43/12

H 0 1 L 43/12

2 G 0 1 7

G 0 1 R 33/09

G 1 1 B 5/39

5 D 0 3 4

G 1 1 B 5/39

H 0 1 F 10/16

5 E 0 4 9

H 0 1 F 10/16

10/32

10/32

H 0 1 L 43/08

Z

審査請求 未請求 請求項の数34 O L (全 42 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2002-32728(P2002-32728)

(22) 出願日 平成14年2月8日 (2002.2.8)

(31) 優先権主張番号 特願2001-214276(P2001-214276)

(32) 優先日 平成13年7月13日 (2001.7.13)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000010098

アルプス電気株式会社

東京都大田区雪谷大塚町1番7号

(72) 発明者 長谷川 直也

東京都大田区雪谷大塚1番7号 アルプス

電気株式会社社内

(72) 発明者 梅津 英治

東京都大田区雪谷大塚1番7号 アルプス

電気株式会社社内

(74) 代理人 100085453

弁理士 野▲崎▼ 照夫

最終頁に続く

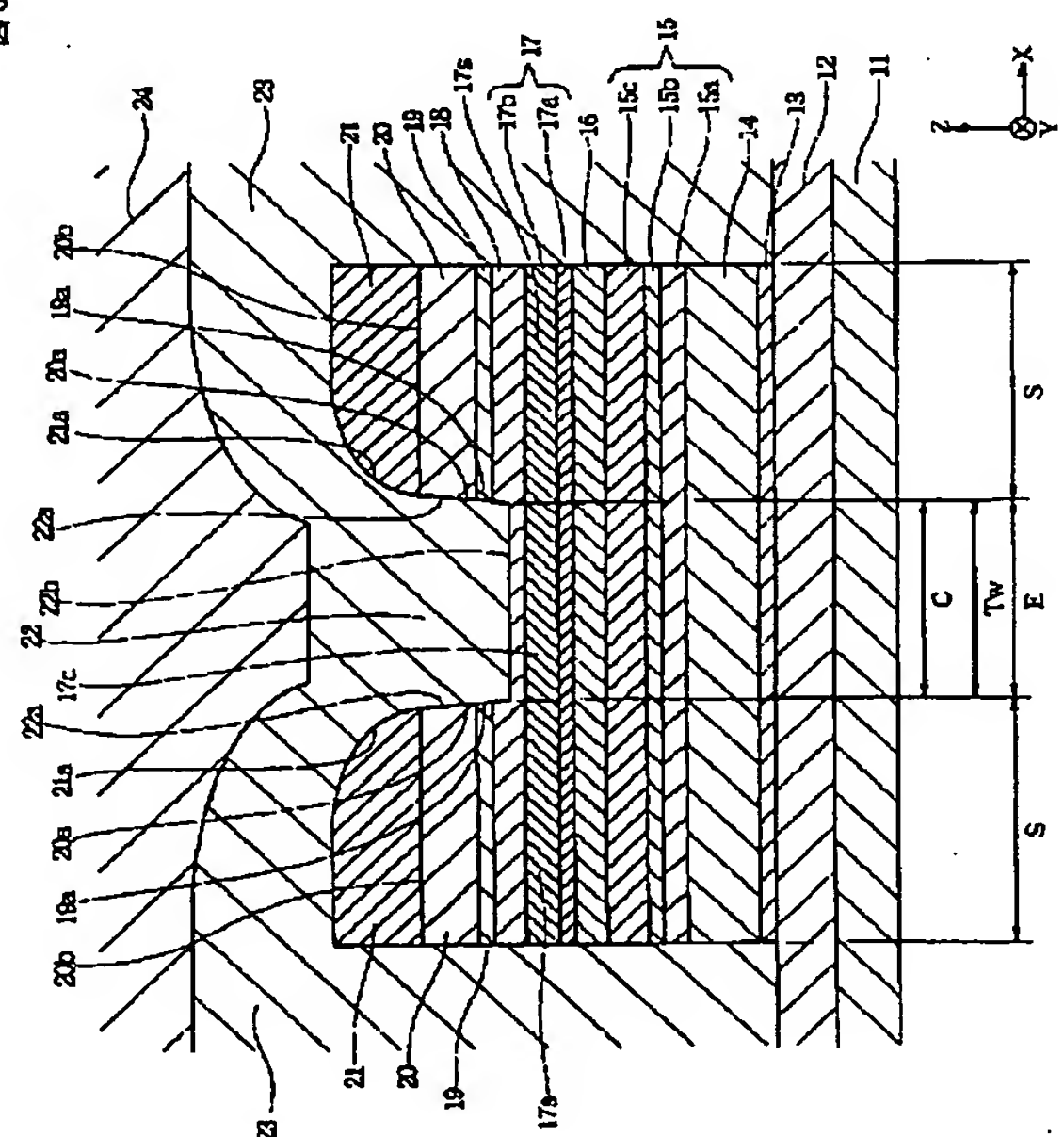
(54) 【発明の名称】 磁気検出素子の製造方法

(57) 【要約】

【課題】 ミリングによって削られた面であるフリー磁性層の両側端面に縦バイアスをかけるための強磁性層を接合するエクスチェンジバイアス方式の磁気検出素子の製造方法では、フリー磁性層に確実に縦バイアスをかけることのできる磁気検出素子を形成することが困難であった。

【解決手段】 一定の厚さで形成されている非磁性層18上に、強磁性層19及び第2反強磁性層20を積層した後、第2反強磁性層20を掘り込んで凹部22を形成することによって、フリー磁性層17をトラック幅方向に確実に単磁区化できる磁気検出素子を形成することができる。

図6



BEST AVAILABLE COPY

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 (a) 基板上に第 1 反強磁性層、固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、及び非磁性層を有する多層膜を成膜する工程と、

(b) 前記多層膜を、第 1 の熱処理温度、第 1 の大きさの磁界中で、第 1 の磁場中アニールして前記固定磁性層の磁化方向を所定方向に固定する工程と、

(c) 前記多層膜上に、強磁性層及び第 2 反強磁性層を成膜する工程と、

(d) 側面が前記第 2 反強磁性層及び前記強磁性層を貫通し、底面が前記非磁性層内に位置する凹部を形成する工程と、

(e) 前記第 2 反強磁性層が積層された多層膜を、第 2 の熱処理温度、第 2 の大きさの磁界中で第 2 の磁場中アニールすることにより、前記フリー磁性層の磁化方向を前記固定磁性層の磁化方向と交叉する方向に固定する工程、を有することを特徴とする磁気検出素子の製造方法。

【請求項 2】 前記 (d) の工程の代わりに、

(f) 前記第 2 反強磁性層に、底面が前記第 2 反強磁性層内に位置する凹部を形成する工程、を有する請求項 1 記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 3】 前記 (f) の工程において、前記凹部の底面の下部に位置する前記第 2 反強磁性層の領域の厚さを 0 \AA より大きく 50 \AA 以下にする請求項 2 に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 4】 前記 (d) の工程の代わりに、

(g) 側面が前記第 2 反強磁性層を貫通し、底面が前記強磁性層内に位置する凹部を形成する工程を有する請求項 1 記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 5】 前記第 2 の反強磁性層上に、トラック幅方向に間隔をあけて一対の電極層を積層する工程を有する請求項 1 ないし 4 のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 6】 前記 (d)、(f) 又は (g) の工程において、前記第 2 の反強磁性膜上に、トラック幅方向に間隔をあけて一対の電極層を積層し、前記第 2 反強磁性層の前記一対の電極層によって挟まれた部位を削り込むことにより底面の幅寸法がトラック幅に等しい凹部を形成する請求項 5 に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 7】 前記 (d)、(f) 又は (g) の工程において、前記第 2 反強磁性層上に、トラック幅方向の間隔をあけて一対の第 1 のレジスト層を積層し、前記第 2 反強磁性層の前記第 1 のレジスト層によって挟まれた部位を削り込むことにより凹部を形成する請求項 5 に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 8】 前記 (d)、(f) 又は (g) の工程において前記凹部を形成して前記第 1 のレジスト層を除去した後に、

(h) 前記凹部内及び前記第 2 反強磁性層上であって前

記凹部の開口部周辺に第 2 のレジスト層を形成する工程と、

(i) 前記第 2 反強磁性層上の前記レジスト層に覆われない領域に電極層を成膜する工程と、

(j) 前記第 2 のレジスト層を除去する工程を有する請求項 7 に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 9】 前記 (d)、(f) 又は (g) の工程において前記凹部を形成して前記第 1 のレジスト層を除去した後に、

(k) 底面のトラック幅方向の幅寸法が、前記第 1 のレジスト層の底面の幅寸法よりも小さい第 2 のレジスト層を、前記凹部の底面上に形成する工程と、

(l) 前記凹部内から前記第 2 反強磁性層上にかけて電極層を成膜する工程と、

(m) 前記第 2 のレジスト層を除去する工程を有する請求項 7 に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 10】 前記 (a) 工程の前に、

(n) 基板上に、下部電極層を形成する工程を有し、前記 (d)、(f) 又は (g) の工程の代わりに、

(o) 前記第 2 の反強磁性層上に絶縁層を成膜する工程と、(p) 前記絶縁層上に、トラック幅方向の中央部に穴部を設けたレジストを積層し、前記絶縁層及び前記第 2 の反強磁性層の前記穴部に露出する部位を削り込むことにより凹部を形成する工程と、

(q) 前記凹部の底面に電氣的に導通する上部電極層を形成する工程と、を有する請求項 1 ないし 4 のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 11】 前記 (p) 工程と前記 (q) 工程の間に、

(r) 前記凹部から前記絶縁層上にかけて他の絶縁層を成膜する工程と、

(s) 前記凹部の底面上に積層された前記他の絶縁層を除去する工程と、を有する請求項 10 に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 12】 前記 (n) 工程と前記 (a) 工程の間に、

(t) 前記下部電極層のトラック幅方向の中央に、前記多層膜方向に突出した突出部を形成する工程と、

(u) 前記下部電極層の前記突出部のトラック幅方向の両側部に絶縁層を設ける工程とを有し、

前記 (a) 工程において、前記突出部の上面が前記多層膜の下面と接するように、前記多層膜を形成する請求項 10 または 11 に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 13】 前記 (u) 工程において、前記突出部の上面と、前記下部電極層の両側端部上に設けられた前記絶縁層の上面を同一平面にする請求項 12 に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項 14】 前記下部電極層及び／又は前記上部電極層を、磁性材料で形成する請求項 10 ないし 13 のい

ずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項15】 前記上部電極層を、前記凹部の底面と電気的に導通する非磁性導電性材料で形成される層と磁性材料で形成される層が積層されたものとして形成する請求項10ないし14のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項16】 前記非磁性材料層を非磁性導電材料で形成する請求項10ないし15のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項17】 前記非磁性材料層を絶縁材料で形成する請求項10ないし15のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項18】 前記(e)の工程において、第2の熱処理温度を第1反強磁性層のブロッキング温度より低い温度に設定する請求項1ないし17のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項19】 前記(e)の工程において、第2の磁界の大きさを第1反強磁性層の交換異方性磁界より小さくする請求項1ないし18のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項20】 前記(a)の工程において、前記非磁性層を導電性材料によって形成する請求項1ないし19のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項21】 前記(a)の工程において、前記非磁性層をRu、Rh、Ir、Re、Osのうち1種あるいは2種以上の合金で形成する請求項20に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項22】 前記非磁性層を、Ruからなりかつ膜厚が0.8～1.1nmとなるように形成する請求項21に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項23】 前記(a)の工程において、前記非磁性層と前記フリー磁性層の間に、比抵抗が前記非磁性層よりも低い導電性材料からなる導電性材料層を形成する請求項1ないし21のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項24】 前記非磁性層をRuからなり、かつ膜厚が0.4～1.1nmとなるように形成する請求項23に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項25】 前記導電性材料層をCuからなり、かつ膜厚が0.3～0.5nmとなるように形成する請求項23または24に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項26】 前記(a)の工程において、前記固定磁性層を、単位面積あたりの磁気モーメントの大きさが異なる複数の強磁性材料層を、非磁性中間層を介して積層することによって形成する請求項1ないし25のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項27】 前記(a)の工程において、前記フリー磁性層を、単位面積あたりの磁気モーメントの大きさが異なる複数の強磁性材料層を非磁性中間層を介して積層することによって形成する請求項1ないし26のい

れかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項28】 前記非磁性中間層を、Ru、Rh、Ir、Os、Cr、Re、Cuのうち1種あるいは2種以上の合金で形成する請求項26または27に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項29】 前記強磁性層と前記フリー磁性層のうち少なくとも一方を、以下の組成を有する磁性材料を用いて形成する請求項1ないし28のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。組成式が CoFeNi で示され、Feの組成比は9原子%以上で17原子%以下で、Niの組成比は0.5原子%以上で10原子%以下で、残りの組成比はCoである磁性材料。

【請求項30】 前記非磁性材料層と前記フリー磁性層との間にCoFe合金あるいはCoからなる中間層を形成する請求項1ないし28のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項31】 前記強磁性層と前記フリー磁性層のうち少なくとも一方を、以下の組成を有する磁性材料を用いて形成する請求項30に記載の磁気検出素子の製造方法。組成式が CoFeNi で示され、Feの組成比は7原子%以上で15原子%以下で、Niの組成比は5原子%以上で15原子%以下で、残りの組成比はCoである磁性材料。

【請求項32】 前記強磁性層と前記フリー磁性層の両方を前記 CoFeNi を用いて形成する請求項29または31に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項33】 前記第1反強磁性層と前記第2反強磁性層を、同じ組成の反強磁性材料を用いて形成する請求項1ないし32のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項34】 前記第1反強磁性層及び／又は前記第2反強磁性層を、PtMn合金、または、 X-Mn （ただしXは、Pd、Ir、Rh、Ru、Os、Ni、Feのいずれか1種または2種以上の元素である）合金で、あるいは Pt-Mn-X' （ただしX'は、Pd、Ir、Rh、Ru、Au、Ag、Os、Cr、Ni、Ar、Ne、Xe、Krのいずれか1種または2種以上の元素である）合金で形成する請求項1ないし33のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、主に、磁気センサやハードディスクなどに用いられる磁気検出素子の製造方法に係り、特に磁界検出能力を向上させることができる磁気検出素子の製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】 図38は、従来の製造方法によって形成された磁気検出素子の構造を記録媒体との対向面から見た断面図である。

【0003】 図38に示す磁気検出素子は、巨大磁気抵

抗効果を利用したGMR (giant magnetoresistive) 素子の1種であるスピバルブ型磁気検出素子と呼ばれるものであり、ハードディスクなどの記録媒体からの記録磁界を検出するものである。

【0004】このスピバルブ型磁気検出素子は、下から基板1、下地層2、第1反強磁性層3、固定磁性層(ピン(Pinned)磁性層)4、非磁性材料層5、フリー磁性層(Free)6、保護層7で構成された多層膜8と、この多層膜8の両側部に形成された一対の強磁性層9、9及びこの強磁性層9、9の上に形成された一対の第2反強磁性層10、10及び電極層L、Lとで構成されている。

【0005】第1反強磁性層3及び第2反強磁性層10、10にはPt-Mn(鉄-マンガン)合金膜、固定磁性層4、フリー磁性層6、及び強磁性層9、9にはNi-Fe(ニッケル-鉄)合金膜、非磁性材料層5にはCu(銅)膜、下地層2及び保護層7にはTa、また電極層L、LにはCr膜が一般的に使用される。

【0006】固定磁性層4の磁化は、第1反強磁性層3との交換異方性磁界によりY方向(記録媒体からの漏れ磁界方向;ハイト方向)に単磁区化されている。

【0007】また、強磁性層9、9は第2反強磁性層10、10との交換異方性磁界によりX方向に単磁区化されている。強磁性層9、9とフリー磁性層6は接合部J、Jにおいて接しており、連続したフェロ磁性体になるようにされている。このように、フリー磁性層6はいわゆるエキスチェンジバイアス方式によってX方向に単磁区化されている。エキスチェンジバイアス方式では、フリー磁性層6の両側端面(接合部J、J)に表面磁荷が発生せずフリー磁性層6内に発生する反磁界を小さくできるという利点がある。

【0008】磁気検出素子では、電極層L、Lから、第2反強磁性層10、10及び強磁性層9、9を介してフリー磁性層6、非磁性材料層5及び固定磁性層4に検出電流(センス電流)が与えられる。ハードディスクなどの記録媒体の走行方向はZ方向であり、記録媒体からの洩れ磁界がY方向に与えられると、フリー磁性層6の磁化がXからY方向へ向けて変化する。このフリー磁性層6内での磁化の方向の変動と、固定磁性層4の固定磁化方向との関係で電気抵抗が変化し(これを磁気抵抗効果という)、この電気抵抗値の変化に基づく電圧変化により、記録媒体からの洩れ磁界が検出される。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】図38の磁気検出素子を製造するときには、基板1上に、下地層2、第1反強磁性層3、固定磁性層4、非磁性材料層5、フリー磁性層6、及び保護層7のそれぞれを一樣な膜として成膜した後、図38の多層膜8となる部分以外をイオンミリングによって削る。その後、多層膜8の側面8a、8aに直接接するように強磁性層9、9を成膜し、さらに、強

磁性層9、9上に第2反強磁性層10、10及び電極層L、Lを成膜する。

【0010】つまり、図38の磁気検出素子では、多層膜8の側面8a、8aはミリングによって削られた界面となっている。このようなミリングによって削られた界面に強磁性層9、9を直接接するように成膜しても、強磁性層9、9とフリー磁性層6とを接合部J、Jにおいて連続したフェロ磁性体とすることは難しく、フリー磁性層6をX方向に安定した単磁区化状態にすることが困難であった。

【0011】また、強磁性層9、9とフリー磁性層6の接合部J、Jは、多層膜8の側面8a、8a上にあるため、接合部J、Jで強磁性層9、9とフリー磁性層6とを磁氣的結合させることが難しく、この理由からもフリー磁性層6をX方向に安定した単磁区化状態にすることが困難であった。

【0012】なお、接合部J、Jで強磁性層9、9とフリー磁性層6との磁氣的結合を安定化させるために、多層膜8の側面8a、8aの傾斜角 θ_1 を小さくすると、フリー磁性層6のトラック幅方向(X方向)の寸法を所定の範囲内で形成することが困難になる。

【0013】このように、図38に示されたエキスチェンジバイアス方式の磁気検出素子では、フリー磁性層6に安定した縦バイアスをかけてX方向に安定した単磁区化状態にすることが困難であるという問題が生じていた。

【0014】さらに、図38のような構造で強磁性層9、9とフリー磁性層6を確実に接合させるためには、強磁性層9、9の膜厚を厚くする必要がある。しかし、強磁性層9、9の膜厚を厚くすると強磁性層9、9の一方異方性磁界が小さくなってフリー磁性層6に十分に安定な縦バイアスをかけることが困難になるという問題も生じる。また、強磁性層9、9の膜厚を厚くするとフリー磁性層6の両端には不感領域が出来て再生感度が低下するという問題も生じる。

【0015】本発明は上記従来の課題を解決するためのものであり、エキスチェンジバイアス方式の磁気検出素子の製造方法であって、フリー磁性層をX方向に安定した単磁区化状態にすることができ、磁界検出感度を向上させることのできる磁気検出素子の製造方法を提供することを目的とする。

【0016】

【課題を解決するための手段】本発明の磁気検出素子の製造方法は、(a)基板上に第1反強磁性層、固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、及び非磁性層を有する多層膜を成膜する工程と、(b)前記多層膜を、第1の熱処理温度、第1の大きさの磁界中で、第1の磁場中アニールして前記固定磁性層の磁化方向を所定の方向に固定する工程と、(c)前記多層膜上に、強磁性層及び第2反強磁性層を成膜する工程と、(d)側面が前記第

2反強磁性層及び前記強磁性層を貫通し、底面が前記非磁性層内に位置する凹部を形成する工程と、(e)前記第2反強磁性層が積層された多層膜を、第2の熱処理温度、第2の大きさの磁界中で第2の磁場中アニールすることにより、前記フリー磁性層の磁化方向を前記固定磁性層の磁化方向と交叉する方向に固定する工程、を有することを特徴とするものである。

【0017】本発明では、前記(c)の工程において前記強磁性層及び前記第2反強磁性層を平坦面として形成された前記非磁性層の表面上に積層するものであるの
10 で、前記強磁性層及び前記第2反強磁性層も平坦化された層として形成でき、前記強磁性層、前記非磁性層、及び前記フリー磁性層からなるシンセティックフェリ構造において前記強磁性層と前記フリー磁性層間のRKKY相互作用を大きくすることが容易になる。

【0018】また、本発明では、前記強磁性層及び前記第2反強磁性層が、平坦面である前記非磁性層上に積層されたものであるので、前記強磁性層及び前記第2反強磁性層の積層工程の制御が容易になる。特に、前記強磁性層、前記非磁性層、及び前記フリー磁性層からなるシンセティックフェリ構造において前記強磁性層を薄く形成することができ、前記強磁性層と前記フリー磁性層間のスピントロニクス磁界を大きくすることが容易になる。

【0019】また、本発明では、前記フリー磁性層である磁性材料層を前記第2反強磁性層及び前記強磁性層の下層にまで延して形成するので、前記フリー磁性層の磁化が前記フリー磁性層の両側端部の表面磁荷によって発生する反磁界の影響を受けることを小さくできる。

【0020】また、本発明では、前記多層膜上に第2反強磁性層を積層しない状態で、前記多層膜を、磁場中アニールして前記固定磁性層の磁化方向を所定方向に固定するので、前記多層膜上に第2反強磁性層を積層した状態では、前記第2反強磁性層に交換異方性磁界が発生していない。

【0021】すなわち、前記第2反強磁性層の交換異方性磁界は、前記(e)の工程において初めて生じ、前記フリー磁性層の磁化方向を所定方向に移動させることが容易になる。従って、前記フリー磁性層の磁化方向を、前記固定磁性層の磁化方向と交叉する方向に固定することが容易になる。

【0022】また、本発明の製造方法によって製造された磁気検出素子では、トラック幅が前記凹部の底面の幅寸法によって規定される。すなわち、前記凹部の底面に重なる部分でのみ、前記フリー磁性層などの外部磁界によって磁化方向が変化する磁性層の磁化方向を変化させることができる。しかも、前記凹部は、一様の厚さで成膜された前記第2反強磁性層を、反応性イオンエッチング(RIE)やイオンミリングを用いて、トラック幅方向に対する垂直方向に削るだけで形成することができるので、正確な幅寸法で前記凹部を形成することが可能に

なる。すなわち、磁気検出素子のトラック幅を正確に規定できる。

【0023】本発明によって形成された磁気検出素子は、前記強磁性層が前記非磁性層の上面に接した状態でトラック幅方向に所定の間隔を開けて形成され、さらに前記強磁性層上に前記第2反強磁性層が積層されているものである。

【0024】本発明によって形成された磁気検出素子では、前記第2反強磁性層の下層にある強磁性層が、前記第2反強磁性層との磁氣的結合によってトラック幅方向に磁化方向がそろえられ、さらに、この強磁性層の下層に非磁性層を介して形成されたフリー磁性層の両側部の磁化方向が、前記強磁性層とのRKKY相互作用によって、前記強磁性層の磁化方向と反平行方向に揃えられる。すなわち、前記第2反強磁性層の下層において前記強磁性層、前記非磁性層、及び前記フリー磁性層がシンセティックフェリ構造となっており、前記フリー磁性層の前記第2反強磁性層及び前記強磁性層に重なる領域である両側部は磁化方向が前記固定磁性層の磁化方向と交叉する方向に固定されている。

【0025】一方、前記フリー磁性層の前記第2反強磁性層及び前記強磁性層に重ならない領域であるトラック幅領域の磁化方向は、外部磁界が与えられない状態のときは前記両側部にならってトラック幅方向と反平行方向を向き、外部磁界がトラック幅方向に垂直な方向(ハイト方向)に与えられると、ハイト方向へ向けて変化する。

【0026】この前記フリー磁性層のトラック幅領域での磁化方向の変動と、前記固定磁性層の固定磁化方向との関係で電気抵抗が変化し(これを磁気抵抗効果という)、この電気抵抗値の変化に基づく電圧変化により、記録媒体からの洩れ磁界などの外部磁界が検出される。

【0027】本発明では、前記第2反強磁性層の下層において前記強磁性層、前記非磁性層、及び前記フリー磁性層がシンセティックフェリ構造となっているので、前記フリー磁性層の両側部における磁化方向を一定方向に揃えるための一方向異方性磁界を大きくすることができる。

【0028】従って、外部磁界によって前記フリー磁性層の両側部の磁化方向が変化し結果として磁氣的トラック幅が大きくなることを抑えることができる。

【0029】また、前記第2反強磁性層と前記強磁性層との交換結合磁界が比較的弱くても、前記フリー磁性層の磁化方向を確実に、前記固定磁性層の磁化方向と交叉する方向に揃えることが容易になる。

【0030】また、前記凹部の底面のトラック幅方向の所定の間隔で規定される磁気検出素子のトラック幅(光学的トラック幅)の領域が、実質的に記録磁界の再生に寄与し、磁気抵抗効果を発揮する感度領域となる。

【0031】すなわち、本発明の磁気検出素子は、磁気

検出素子の光学的トラック幅が磁氣的トラック幅に等しくなり、不感領域が生じないので、高記録密度化に対応するために磁気検出素子の光学的トラック幅 T_w を小さくしていった場合の再生出力の低下を抑えることができる。

【0032】また、前記フリー磁性層に印加されるバイアス磁界の大きさと、前記フリー磁性層の単位面積当りの磁気モーメント ($M_s \times t$) が等しくなるため高感度で高出力な磁気検出素子となる。

【0033】また、本発明では、前記フリー磁性層である磁性材料層を前記第2反強磁性層及び前記強磁性層の下層にまで延して形成するので、前記フリー磁性層の磁化が前記フリー磁性層の両側端部の表面磁荷によって発生する反磁界の影響を受けることを小さくできる。

【0034】また、本発明では、前記(d)の工程の代わりに、(f)前記第2反強磁性層に、底面が前記第2反強磁性層内に位置する凹部を形成する工程を有してもよい。

【0035】前記(d)工程の代わりに、前記(f)工程を有する磁気検出素子の製造方法によって形成された磁気検出素子では、前記凹部の底面が前記第2反強磁性層内に位置しており、前記フリー磁性層と前記強磁性層が、前記非磁性層を介して隣接し、前記フリー磁性層の磁化方向と前記強磁性層の磁化方向が反平行となるフェリ磁性状態となる。

【0036】このとき、前記フリー磁性層、前記非磁性層及び前記強磁性層からなる多層膜がひとつのフリー磁性層、いわゆるシンセティックフェリフリー磁性層として機能する。シンセティックフェリフリー磁性層では、前記フリー磁性層の膜厚を薄くすることと同等の効果が得られ、フリー磁性層の磁化が変動しやすくなり、磁気抵抗効果素子の磁界検出感度が向上する。なお、前記フリー磁性層と前記強磁性層の単位面積あたりの磁気モーメントの大きさは異なっている必要がある。前記フリー磁性層及び強磁性層の単位面積あたりの磁気モーメントの大きさは、前記強磁性材料層の飽和磁化 (M_s) と膜厚 (t) の積で表される。

【0037】なお、前記凹部の底面の下部に位置する前記第2反強磁性層の領域の厚さを 0 \AA より大きく 50 \AA 以下にすると、前記凹部の底面の下部に位置する前記第2反強磁性層の領域では前記強磁性層との間に交換結合磁界が発生しないので好ましい。

【0038】また、本発明では、前記(d)の工程の代わりに、(g)側面が前記第2反強磁性層を貫通し、底面が前記強磁性層内に位置する凹部を形成する工程を有してもよい。

【0039】前記(d)工程の代わりに、前記(g)工程を有する磁気検出素子の製造方法によって形成された磁気検出素子でも前記フリー磁性層、前記非磁性層及び前記強磁性層からなる多層膜がひとつのフリー磁性層、

いわゆるシンセティックフェリフリー磁性層として機能する。本発明では、前記フリー磁性層の外部磁化によって磁化方向が変化するトラック幅領域の上層に第2反強磁性層が全く存在しない。従って、フリー磁性層のトラック幅領域の磁化方向の、外部磁界依存性の変動を鋭敏にでき、磁気検出素子の磁界検出感度を向上できる。

【0040】さらに、本発明では前記凹部の側面をトラック幅方向に対して垂直面となるようにすることが可能である。すなわち、トラック幅領域から外れた全領域において、第2反強磁性層が反強磁性を発生するために十分な膜厚を有することができ、トラック幅領域から外れた全領域において前記フリー磁性層の磁化方向を確実に固定することができる。

【0041】従って、磁気検出素子のトラック幅領域でのみ前記フリー磁性層の磁化方向を動かし、トラック幅領域周辺におけるサイドリーディングを防止することができる。

【0042】なお、本発明では、前記第2の反強磁性層上に、トラック幅方向に間隔をあけて一対の電極層を積層する工程を有することにより、前記多層膜の各層の膜面に対し平行な方向に電流が流れる磁気検出素子を形成できる。

【0043】本発明では、前記(d)、(f)又は(g)の工程において、前記第2の反強磁性膜上に、トラック幅方向に間隔をあけて一対の電極層を積層し、前記第2反強磁性層の前記一対の電極層によって挟まれた部位を削り込むことにより底面の幅寸法がトラック幅に等しい凹部を形成することができる。

【0044】このように、前記一対の電極層をマスクとして前記凹部を削り込むと、前記電極層のトラック幅領域側の側端面が、前記第2反強磁性層の前記トラック幅領域側の側端面と連続面となっている磁気検出素子を形成できる。

【0045】または、本発明では、前記(d)、(f)又は(g)の工程において、前記第2反強磁性層上に、トラック幅の間隔をあけて一対の第1のレジスト層を積層し、前記第2反強磁性層の前記第1のレジスト層によって挟まれた部位を削り込むことにより凹部を形成することができる。

【0046】さらに、前記凹部を形成して前記第1のレジスト層を除去した後に、(h)前記凹部内及び前記第2反強磁性層上であって前記凹部の開口部周辺に第2のレジスト層を形成する工程と、(i)前記第2反強磁性層上の前記レジスト層に覆われていない領域に電極層を成膜する工程と、(j)前記第2のレジスト層を除去する工程を有してもよい。

【0047】前記(d)工程において、前記第1のレジスト層をマスクとして前記凹部を形成した後、前記(h)工程で形成された第2のレジスト層をマスクとして電極層を形成することによって、前記電極層のトラッ

ク幅領域側の側端縁が、前記第2反強磁性層の前記トラック幅領域側の側端縁よりも、前記多層膜の外端部側に形成されている磁気検出素子を形成できる。

【0048】本発明によって形成される磁気検出素子は、その上層及び下層に絶縁性材料からなるギャップ層を介して磁性材料からなる上部シールド層及び下部シールド層が形成されることができる。

【0049】前記電極層のトラック幅領域側の側端縁が前記第2反強磁性層の前記トラック幅領域側の側端縁よりも、前記多層膜の外端部側に形成されていると、前記非磁性層のトラック幅領域の上面と前記電極層及び前記第2反強磁性層の上面とがつくる段差をなだらかにすることができる。従って、磁気検出素子の上層の前記ギャップ層の膜厚を小さくしても、この段差上に前記ギャップ層が確実に形成されるようにできる。すなわち、前記上部シールド層と前記電極層、前記第2反強磁性層、及び前記強磁性層との間の電氣的短絡をより確実に防止でき、狭ギャップ化に対応できるようになる。

【0050】また、前記多層膜のトラック幅領域の両側近傍における前記上部シールド層と前記下部シールド層間の距離が大きくなると、前記上部シールド層と前記下部シールド層の間を通過して、検出対象の記録トラックの両側の記録トラックから発生する記録媒体からの磁界が磁気検出素子に侵入しやすくなり、実効トラック幅が大きくなる。すなわち、記録トラック間のクロストークが発生しやすくなる。

【0051】本発明では、前述のように、前記非磁性層のトラック幅領域の上面と前記電極層及び前記第2反強磁性層の上面とがつくる段差をなだらかにすることができるので、前記多層膜の両側近傍における前記上部シールド層と前記下部シールド層間の距離が大きくなることを抑え、実効トラック幅を小さくすることができる。

【0052】あるいは、本発明では、前記(d)、(f)又は(g)の工程において前記凹部を形成して前記第1のレジスト層を除去した後に、(k)底面のトラック幅方向の幅寸法が、前記第1のレジスト層の底面の幅寸法よりも小さい第2のレジスト層を、前記凹部の底面上に形成する工程と、(l)前記凹部内から前記第2反強磁性層上にかけて電極層を成膜する工程と、(m)前記第2のレジスト層を除去する工程を有してもよい。

【0053】前記(d)、(f)又は(g)工程において、前記第1のレジスト層をマスクとして前記凹部を形成した後、前記(k)工程で形成された第2のレジスト層をマスクとして電極層を形成することによって、前記電極層が前記第2反強磁性層上に積層され、前記電極層のトラック幅領域側の側端縁が、前記強磁性層及び前記第2反強磁性層の前記トラック幅領域側の側端縁よりも前記多層膜の中央部側に延されて形成される磁気検出素子を形成できる。

【0054】前記強磁性層及び前記第2反強磁性層は、

前記電極層に比べて比抵抗が大きい材料によって形成される。前記電極層が前記強磁性層及び前記第2反強磁性層上のみに積層されると、前記電極層に供給された直流電流は前記強磁性層及び前記第2反強磁性層を介して前記非磁性層、前記フリー磁性層、前記非磁性材料層、及び固定磁性層に流れることになり、磁気検出素子の直流抵抗値が大きくなってしまう。

【0055】前記電極層のトラック幅領域側の側端縁が、前記強磁性層及び前記第2反強磁性層の前記トラック幅領域側の側端縁よりも前記多層膜の中央部側に延されていると、前記電極層のトラック幅領域側の側端縁を前記非磁性層上にまで延長でき、前記電極層に供給された直流電流を前記強磁性層及び前記第2反強磁性層を介さずに流すことができるので、磁気検出素子の直流抵抗値を小さくできる。

【0056】また、前記電極層のトラック幅領域側の側端縁が前記非磁性層上にまで延長されると磁気検出素子のトラック幅Twが一对の電極層のトラック幅領域側の側端縁間距離で規定されるので、第2反強磁性層のトラック幅領域側の側端面付近の領域で前記第2反強磁性層の組成が変化したりだれが生じたりすることによって、フリー磁性層17の側端部17s、17sのトラック幅領域付近の磁化方向が動きやすくなっても、トラック幅Twが変化することを抑えることができる。

【0057】なお、本発明では、前記多層膜の上下に電極層が設けられ、電流が前記多層膜の各層の膜面に対し垂直方向に流れるCPP (current perpendicular to the plane) 型の磁気検出素子を形成することができる。

【0058】CPP型の磁気検出素子を形成するときには、前記(a)工程の前に、(n)基板上に、下部電極層を形成する工程を有することが必要であり、さらに、前記(d)、(f)又は(g)の工程の代わりに以下の工程を有することが好ましい。(o)前記第2の反強磁性層上に絶縁層を成膜する工程と、(p)前記絶縁層上に、トラック幅方向に中央部に穴部を設けたレジストを積層し、前記絶縁層及び前記第2の反強磁性層の前記穴部に露出した部位を削り込むことにより凹部を形成する工程と、(q)前記凹部の底面に電氣的に導通する上部電極層を形成する工程。

【0059】本発明では、前記第2の反強磁性層上に前記絶縁層を設けることにより、前記上部電極層から前記第2反強磁性層へのセンス電流の分流を低減できる。

【0060】また、上部電極層の一部が前記凹部の中に入り込むことによって、前記上部電極層のトラック幅方向の中央に、前記多層膜方向に突出した突出部を形成できるので、センス電流の電流路を絞り込むことができ出力の向上及びサイドリーディングの低減を図ることができる。

【0061】また、前記(p)工程と前記(q)工程の間に、(r)前記凹部から前記絶縁層上にかけて他の絶

縁層を成膜する工程と、(s) 前記凹部の底面上に積層された前記他の絶縁層を除去する工程と、を有すると、前記凹部の側面と前記上部電極層との間の絶縁もとることができるので好ましい。

【0062】また、前記(n) 工程と前記(a) 工程の間に、(t) 前記下部電極層のトラック幅方向の中央に、前記多層膜方向に突出した突出部を形成する工程と、(u) 前記下部電極層の前記突出部のトラック幅方向の両側部に絶縁層を設ける工程とを有し、前記(a) 工程において、前記突出部の上面が前記多層膜の下面と接するように、前記多層膜を形成すると、センス電流の電流路を絞り込むことができ出力の向上及びサイドリーディングの低減を図ることができるので好ましい。

【0063】なお、前記(u) 工程において、前記突出部の上面と、前記下部電極層の両側端部に設けられた前記絶縁層の上面を同一平面にすると、前記多層膜を平坦面上に形成することができるので好ましい。

【0064】また、前記下部電極層及び／又は前記上部電極層を、磁性材料で形成すると、前記下部電極層及び／又は前記上部電極層をシールド層として機能させることができるので磁気検出素子の構造が単純になり製造が容易になる、また、ギャップ長を短くすることができ高記録密度化に適切に対応可能な磁気検出素子を製造できるので好ましい。

【0065】さらに、前記上部電極層を、前記凹部の底面と電気的に導通する非磁性導電性材料で形成される層と磁性材料で形成される層が積層されたものにする、前記上部電極層の磁性材料で形成される層から、前記フリー磁性層への磁気的な影響を低減できる。

【0066】また本発明では、前記非磁性材料層を非磁性導電材料で形成することが好ましい。前記非磁性材料層が非磁性導電材料で形成された磁気検出素子を、スピバルブGMR型磁気抵抗効果素子(CPP-GMR)と呼んでいる。

【0067】また本発明では、CPP型の磁気検出素子である場合、前記非磁性材料層を絶縁材料で形成してもよい。この磁気検出素子をスピバルブトンネル型磁気抵抗効果型素子(CPP-TMR)と呼んでいる。

【0068】なお、本発明では、前記(e) の工程において、第2の熱処理温度を第1反強磁性層のブロック温度より低い温度に設定し、第2の磁界の大きさを第1反強磁性層の交換異方性磁界より小さくすることが好ましい。

【0069】なお、前記(a) の工程で、前記非磁性層を導電性材料で形成すると、前記非磁性層が後述するスピフィルター効果を有するバックド層として機能し、磁気検出素子の磁界検出感度を向上させることができる。

【0070】前記非磁性層は、例えばRu、Rh、Ir、Re、Osのうち1種あるいは2種以上の合金で形

成すると前記(b) 工程において、前記非磁性層の表面がほとんど酸化しないので好ましい。従って、前記

(d) 工程において、前記非磁性層上に前記強磁性層をスパッタ成膜する前に、前記非磁性層の表面をミリングなどで処理しなくても、前記フリー磁性層と前記強磁性層との間に前記非磁性層を介したRKKY相互作用を働かせることができる。

【0071】すなわち、本発明の磁気検出素子の製造方法によれば、前記非磁性層と前記強磁性層との界面を、ミリングによって削られた面としなくてもすむようにできるので、前記フリー磁性層の両側部における磁化方向を一定方向に揃えるための一方向異方性磁界の低下を防ぐことができる。

【0072】ただし、本発明では前記強磁性層と前記フリー磁性層は、前記非磁性層を介したRKKY相互作用によって磁氣的に結合されたものである、前記非磁性層と前記強磁性層との界面がミリングによって処理された面とされた場合でも、前記フリー磁性層の両側部における磁化方向を一定方向に揃えるのに十分な大きさの一方向異方性磁界を得ることができる。

【0073】前記非磁性層がRuによって形成され、膜厚が0.8~1.1nmであると、前記強磁性層と前記フリー磁性層の両側部との間のRKKY相互作用を大きくすることができるので好ましい。特に、前記非磁性層がRuによって形成され、膜厚が0.85~0.9nmであることがより好ましい。

【0074】また、前記(a) の工程において、前記非磁性層と前記フリー磁性層の間に、比抵抗が前記非磁性層よりも低い導電性材料からなる導電性材料層が形成されていると、前記非磁性層だけの場合よりも大きなスピフィルター効果を奏することができるようになり、磁気検出素子の磁界検出感度をさらに向上させることができるので好ましい。

【0075】前記導電性材料層を形成するときには、例えば前記非磁性層をRuによって膜厚が0.4~1.1nmであるものとして形成し、さらに、前記導電性材料層をCuによって膜厚が0.3~0.5nmであるものとして形成することができる。

【0076】前記フリー磁性層の上面に接して積層された前記非磁性層が導電性材料によって形成されているか、または前記非磁性層と前記フリー磁性層の間に前記導電性材料層が形成されていると、前記非磁性層をスピフィルター効果を有するバックド層(backed layer)として機能させることが可能になる。

【0077】スピバルブ型磁気検出素子にセンス電流を印加すると、伝導電子はおもに電気抵抗の小さい非磁性材料層付近を移動する。この伝導電子にはアップスピンとダウンスピンの2種類の電子が確率的に等量存在する。

【0078】スピバルブ型磁気検出素子の磁気抵抗変

化率は、これらの2種類の伝導電子の平均自由行程の行程差に対して正の相関を示す。

【0079】ダウンスピンの伝導電子については、印加される外部磁界の向きにかかわらず、非磁性材料層とフリー磁性層との界面で常に散乱され、フリー磁性層に移動する確率は低いまま維持され、その平均自由行程はアップスピンの伝導電子の平均自由行程に比べて短いままである。

【0080】一方、アップスピンの伝導電子については、外部磁界によってフリー磁性層の磁化方向が固定磁性層の磁化方向と平行状態になったときに、非磁性材料層からフリー磁性層に移動する確率が高くなり、平均自由行程が長くなっている。これに対し、外部磁界によってフリー磁性層の磁化方向が固定磁性層の磁化方向に対して平行状態から変化するに従って、非磁性材料層とフリー磁性層との界面で散乱される確率が増加し、アップスピンの伝導電子の平均自由行程が短くなる。

【0081】このように外部磁界の作用によって、アップスピンの伝導電子の平均自由行程がダウンスピンの伝導電子の平均自由行程に比べて大きく変化する。すると、アップスピン電子が受ける抵抗とダウンスピン電子が受ける抵抗の並列回路として表わされる素子全体としての抵抗も大きく変化する。スピバルブ型磁気検出素子の磁気抵抗変化率 ($\Delta R/R$) が大きくなる。

【0082】ここで、フリー磁性層にバックド層が接続されると、フリー磁性層中を移動するアップスピンの伝導電子がバックド層内にまで移動することが可能になり、バックド層の膜厚に比例してアップスピンの伝導電子の平均自由行程をさらに伸ばすことができる。このため、いわゆるスピフィルター効果を発現させることが可能となり、伝導電子の平均自由行程の行程差が大きくなって、スピバルブ型磁気検出素子の磁気抵抗変化率 ($\Delta R/R$) をより向上させることができる。

【0083】本発明では、前記フリー磁性層の膜厚が1.5~4.5nmの範囲に設定されることが好ましい。

【0084】スピフィルター効果によるアップスピンの伝導電子とダウンスピンの伝導電子の平均自由行程差の拡大はフリー磁性層の膜厚が比較的薄い場合により効果を発揮する。

【0085】フリー磁性層の膜厚が1.5nmより薄いと強磁性材料層として機能するように形成することが難しくなり十分な磁気抵抗効果を得ることができない。また、鏡面反射 (specular reflection) せずに通常の散乱 (diffusive scattering) をする伝導電子も存在するため、抵抗変化率が低下してしまうので好ましくない。

【0086】また、フリー磁性層の膜厚が4.5nmより厚いと前記非磁性層に到達する前に散乱されてしまうアップスピンの伝導電子が増加してスピフィルター効

果によって抵抗変化率が変化する割合が減少するため好ましくない。

【0087】本発明では、前記(a)の工程において、前記固定磁性層を、単位面積あたりの磁気モーメントの大きさが異なる複数の強磁性材料層を、非磁性中間層を介して積層し、前記非磁性中間層を介して隣接する前記強磁性材料層の磁化方向が反平行となるフェリ磁性状態とすることが好ましい。

【0088】固定磁性層が非磁性中間層の上下に強磁性材料層が積層されたものとして形成されると、これら複数層の強磁性材料層が互いの磁化方向を固定しあい、全体として固定磁性層の磁化方向を一定方向に強力に固定することができる。すなわち、第2反強磁性層と固定磁性層との交換結合磁界 H_{ex} を大きな値として得ることができる。

【0089】また、固定磁性層の固定磁化による反磁界 (双極子磁界) を、複数層の強磁性材料層の静磁界結合同士が相互に打ち消し合うことによりキャンセルできる。これにより、固定磁性層の固定磁化による反磁界 (双極子磁界) からの、フリー磁性層の変動磁化への寄与を減少させることができる。

【0090】従って、フリー磁性層の変動磁化の方向を所望の方向に補正することがより容易になり、アシンメトリーの小さい対称性の優れた磁気検出素子を得ることが可能になる。

【0091】ここで、アシンメトリーとは、再生出力波形の非対称性の度合いを示すものであり、再生出力波形が与えられた場合、波形が対称であればアシンメトリーが小さくなる。従って、アシンメトリーが0に近づく程再生出力波形が対称性に優れていることになる。

【0092】前記アシンメトリーは、フリー磁性層の変動磁化の方向と固定磁性層の固定磁化の方向とが直交しているときに0となる。アシンメトリーが大きくなるとメディアからの情報の読み取りが正確にできなくなり、エラーの原因となる。このため、前記アシンメトリーが小さいものほど、再生信号処理の信頼性が向上することになり、スピバルブ磁気検出素子として優れたものとなる。

【0093】また、固定磁性層の固定磁化による反磁界 (双極子磁界) H_d は、前記フリー磁性層の素子高さ方向において、その端部で大きく中央部で小さいという不均一な分布を持ち、フリー磁性層内における単磁区化が妨げられる場合があるが、固定磁性層を上記の積層構造とすることにより双極子磁界 H_d をほぼ $H_d = 0$ とすることができ、これによってフリー磁性層内に磁壁ができて磁化の不均一が発生しバルクハウゼンノイズなどが発生することを防止することができる。

【0094】また、本発明では、前記(a)の工程において、前記フリー磁性層を、単位面積あたりの磁気モーメントの大きさが異なる複数の強磁性材料層を、非磁性

10

20

30

40

50

中間層を介して積層し、前記非磁性中間層を介して隣接する前記強磁性材料層の磁化方向が反平行となるフェリ磁性状態であると、前記フリー磁性層の膜厚を薄くして磁界検出感度を向上させることと同様の効果が得られるので好ましい。

【0095】なお、前記強磁性材料層の単位面積あたりの磁気モーメントの大きさは、前記強磁性材料層の飽和磁化 (M_s) と膜厚 (t) の積で表される。

【0096】前記非磁性中間層は、Ru、Rh、Ir、Os、Cr、Re、Cuのうち1種あるいは2種以上の合金で形成されることができ、

【0097】また、本発明では、前記強磁性層と前記フリー磁性層のうち少なくとも一方を、以下の組成を有する磁性材料を用いて形成することが好ましい。

【0098】組成式が CoFeNi で示され、Feの組成比は9原子%以上で17原子%以下で、Niの組成比は0.5原子%以上で10原子%以下で、残りの組成比はCoである磁性材料。

【0099】また、本発明では、前記フリー磁性層と前記非磁性材料層との間に CoFe 合金あるいはCoからなる中間層を形成することが好ましい。

【0100】前記中間層が形成されるときには、前記強磁性層と前記フリー磁性層のうち少なくとも一方を、以下の組成を有する磁性材料を用いて形成することが好ましい。組成式が CoFeNi で示され、Feの組成比は7原子%以上で15原子%以下で、Niの組成比は5原子%以上で15原子%以下で、残りの組成比はCoである磁性材料。

【0101】本発明では、前記強磁性層及び前記フリー磁性層の両方を前記 CoFeNi で形成することが好ましい。

【0102】ところで本発明では、前記第2反強磁性層の下層において前記強磁性層、前記非磁性層、及び前記フリー磁性層が積層フェリ構造であり、前記非磁性層を介して隣接する前記強磁性層とフリー磁性層の磁化方向が反平行となるフェリ磁性状態である。

【0103】この反平行磁化状態を適切に保つには、前記強磁性層と前記フリー磁性層の材質を改良して前記強磁性層と前記フリー磁性層間に働くRKKY相互作用における交換結合磁界を大きくする必要がある。

【0104】前記強磁性層と前記フリー磁性層を形成する磁性材料としてよく使用されるものに NiFe 合金がある。 NiFe 合金は軟磁気特性に優れるため従来からフリー磁性層などに使用されていたが、前記強磁性層と前記フリー磁性層を NiFe 合金を用いて積層フェリ構造にした場合、これらの層間の反平行結合力はさほど強くはない。

【0105】そこで本発明では、前記強磁性層と前記フリー磁性層の材質を改良し、前記強磁性層と前記フリー磁性層間の反平行結合力を強め、トラック幅方向の両側

に位置するフリー磁性層の両側端部が外部磁界に対し揺らがないようにし、サイドリーディングの発生を適切に抑制できるようにすべく、前記強磁性層と前記フリー磁性層のうち少なくとも一方、好ましくは両方に CoFeNi 合金を使用することとしている。Coを含有させることで上記の反平行結合力を強めることができる。

【0106】図18は、強磁性材料からなる薄膜を非磁性材料層を介して積層したいわゆる積層フェリ構造体のヒステリシスループの概念図である。例えば第1の強磁性材料層 (F_1) の単位面積あたりの磁気モーメント (飽和磁化 $M_s \times$ 膜厚 t) は第2の強磁性材料層 (F_2) の単位面積あたりの磁気モーメントよりも大きいとする。また外部磁界を図示右方向に与えたとする。

【0107】第1の強磁性材料層の単位面積あたりの磁気モーメントと第2の強磁性材料層の単位面積あたりの磁気モーメントとのベクトル和 ($|M_s \cdot t (F_1) + M_s \cdot t (F_2)|$) で求めることができる単位面積あたりの合成磁気モーメントは、0磁界から外部磁界を大きくしていてもある時点までは、一定の大きさである。この単位面積あたりの合成磁気モーメントが一定の大きさである外部磁界領域Aでは、前記第1の強磁性材料層と第2の強磁性材料層間に働く反平行結合力が、前記外部磁界よりも強いので、前記第1及び第2の強磁性材料層の磁化は適切に単磁区化され反平行状態に保たれている。

【0108】ところが、さらに図示右方向への外部磁界を大きくしていくと、強磁性材料層の単位面積あたりの合成磁気モーメントは傾斜角を有して大きくなっていく。これは、前記外部磁界の方が、前記第1の強磁性材料層及び第2の強磁性材料層間に働く反平行結合力よりも強いから、単磁区化していた第1の強磁性材料層と第2の強磁性材料層の磁化が分散して多磁区化状態となり、ベクトル和で求めることができる単位面積あたりの合成磁気モーメントが大きくなっていくのである。この単位面積あたりの合成磁気モーメントが大きくなっていく外部磁界領域Bでは、もはや前記強磁性材料層の反平行状態は崩れた状態にある。この単位面積あたりの合成磁気モーメントが大きくなり始める出発点の外部磁界の大きさをスピントロポ磁界 (H_{sf}) と呼んでいる。

【0109】さらに図示右方向の外部磁界を大きくしていくと、第1の強磁性材料層及び第2の強磁性材料層の磁化は、再び単磁区化され、今度は外部磁界領域Aの場合と異なり、共に図示右方向に磁化され、この外部磁界領域Cでの単位面積あたりの合成磁気モーメントは一定値となる。この単位面積あたりの合成磁気モーメントが一定値となる時点での外部磁界の大きさを飽和磁界 (H_s) と呼んでいる。

【0110】前記 CoFeNi 合金を第1の強磁性材料層及び第2の強磁性材料層に使用すると、 NiFe 合金を使用した場合に比べて反平行状態が崩れるときの磁

界、いわゆるスピントロップ磁界 (H_{sf}) を十分に大きくできることがわかった。

【0111】第1及び第2の強磁性材料層にNiFe合金(比較例)及びCoFeNi合金(実施例)を用いて上記したスピントロップ磁界の大きさを求めるための実験を以下の膜構成を用いて行った。

【0112】基板/非磁性材料層(Cu)/第1の強磁性材料層(2.4)/非磁性層(Ru)/第2の強磁性材料層(1.4)。なお括弧書きは膜厚を示し単位はnmである。

【0113】比較例での第1の強磁性材料層及び第2の強磁性材料層には、Niの組成比が80原子%でFeの組成比が20原子%からなるNiFe合金を使用した。このときのスピントロップ磁界 (H_{sf}) は約59 (kA/m) であった。

【0114】次に実施例での第1の強磁性材料層及び第2の強磁性材料層には、Coの組成比が87原子%で、Feの組成比が11原子%で、Niの組成比が2原子%からなるCoFeNi合金を使用した。このときのスピントロップ磁界 (H_{sf}) は約293 (kA/m) であった。

【0115】このように第1の強磁性材料層及び第2の強磁性材料層にはNiFe合金を用いるよりもCoFeNi合金を用いる方が、スピントロップ磁界を効果的に向上させることができることがわかった。

【0116】すなわち、前記強磁性層と前記フリー磁性層のうち少なくとも一方、好ましくは両方にCoFeNi合金を使用すると、前記強磁性層と前記フリー磁性層のスピントロップ磁界を効果的に向上させることができる。

【0117】次に、CoFeNi合金の組成比について説明する。CoFeNi合金は、非磁性層であるRu層と接することでNiFe合金を用いる場合より、磁歪が $1 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$ 程度、正側にシフトすることがわかっている。

【0118】前記磁歪は -3×10^{-6} から 3×10^{-6} の範囲内であることが好ましい。また保磁力は790 (A/m) 以下であることが好ましい。磁歪が大きいと、成膜ひずみや、他層間での熱膨張係数の差などによって応力の影響を受けやすくなるから前記磁歪は低いことが好ましい。また保磁力は低いことが好ましく、これによってフリー磁性層の外部磁界に対する磁化反転を良好にすることができる。

【0119】本発明では、非磁性材料層/フリー磁性層/非磁性層/強磁性層の膜構成で形成されるとき、前記CoFeNiのFe組成比は9原子%以上で17原子%以下で、Niの組成比は0.5原子%以上で10原子%以下で、残りの組成比はCoであることが好ましい。Feの組成比が17原子%よりも大きくなると、磁歪が -3×10^{-6} よりも負に大きくなると共に軟磁気特性を劣

化させて好ましくない。

【0120】またFeの組成比が9原子%よりも小さくなると、磁歪が 3×10^{-6} よりも大きくなると共に、軟磁気特性の劣化を招き好ましくない。

【0121】またNiの組成比が10原子%よりも大きくなると、磁歪が 3×10^{-6} よりも大きくなると共に、非磁性材料層との間でNiの拡散等による抵抗変化量(ΔR)及び抵抗変化率($\Delta R/R$)の低下を招き好ましくない。

10 【0122】またNiの組成比が0.5原子%よりも小さくなると、磁歪が -3×10^{-6} よりも負に大きくなって好ましくない。

【0123】また上記した組成範囲内であれば保磁力を790 (A/m) 以下にすることができる。

【0124】次に、前記フリー磁性層と前記非磁性材料層と間にCoFe合金あるいはCoからなる中間層を形成するとき、具体的には、例えば非磁性材料層/中間層(CoFe合金)/フリー磁性層/非磁性層/強磁性層の膜構成で形成されるとき、前記CoFeNiのFe組成比は7原子%以上で15原子%以下で、Niの組成比は5原子%以上で15原子%以下で、残りの組成比はCoであることが好ましい。Feの組成比が15原子%よりも大きくなると、磁歪が -3×10^{-6} よりも負に大きくなると共に軟磁気特性を劣化させて好ましくない。

【0125】またFeの組成比が7原子%よりも小さくなると、磁歪が 3×10^{-6} よりも大きくなると共に、軟磁気特性の劣化を招き好ましくない。

【0126】またNiの組成比が15原子%よりも大きくなると、磁歪が 3×10^{-6} よりも大きくなって好ましくない。

30 【0127】またNiの組成比が5原子%よりも小さくなると、磁歪が -3×10^{-6} よりも負に大きくなって好ましくない。

【0128】また上記した組成範囲内であれば保磁力を790 (A/m) 以下にすることができる。

【0129】なお、CoFeやCoで形成された中間層はマイナス磁歪を有しているため、前記中間層を第1のフリー磁性層と非磁性材料層間に介在させない膜構成の場合に比べて、CoFeNi合金のFe組成をやや少なくし、Ni組成をやや多くしている。

【0130】また上記の膜構成のように、非磁性材料層とフリー磁性層間にCoFe合金あるいはCoからなる中間層を介在させることで、フリー磁性層と非磁性材料層間での金属元素の拡散をより効果的に防止することができて好ましい。

【0131】なお、本実施の形態では、前記第1反強磁性層と前記第2反強磁性層を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成しても、前記第1反強磁性層の磁化方向と前記第2反強磁性層の磁化方向を交叉させることが容易に可能となり、外部磁界が印加されていない状態で、前記

フリー磁性層と前記固定磁性層の磁化方向を交叉させることができる。

【0132】前記第1反強磁性層及び／又は前記第2反強磁性層は、PtMn合金により形成されていることが好ましい。または前記反強磁性層は、X-Mn（ただしXは、Pd, Ir, Rh, Ru, Os, Ni, Feのいずれか1種または2種以上の元素である）合金で、あるいはPt-Mn-X'（ただしX'は、Pd, Ir, Rh, Ru, Au, Ag, Os, Cr, Ni, Ar, Ne, Xe, Krのいずれか1種または2種以上の元素である）合金で形成されることができ

【0133】ここで、前記PtMn合金及び前記X-Mnの式で示される合金において、PtあるいはXが37～63at%の範囲であることが好ましい。特に規定しない限り、～で示す数値範囲の上限と下限は以下、以上を意味する。

【0134】また、Pt-Mn-X'の式で示される合金において、X'+Ptが37～63at%の範囲であることが好ましい。さらに、前記Pt-Mn-X'の式で示される合金において、X'が0.2～10at%の範囲であることが好ましい。ただし、X'がPd, Ir, Rh, Ru, Os, Ni, Feのいずれか1種または2種以上の元素である場合には、X'は0.2～40at%の範囲であることが好ましい。

【0135】第1反強磁性層及び第2反強磁性層として、これらの適切な組成範囲の合金を使用し、これを熱処理することにより、大きな交換結合磁界を発生する第1反強磁性層及び第2反強磁性層を得ることができる。特に、PtMn合金であれば、48kA/m以上、例えば64kA/mを越える交換結合磁界を有し、前記交換結合磁界を失うブロッキング温度が380℃と極めて高い優れた第1反強磁性層及び第2反強磁性層を得ることができる。

【0136】これらの合金は、成膜直後の状態では、不規則系の面心立方構造（fcc）であるが、熱処理によってCuAuI型の規則型の面心正方構造（fct）に構造変態する。

【0137】なお、前記（a）の工程を、同一真空成膜装置内において行うことが好ましい。

【0138】

【発明の実施の形態】図1から図5は、本発明の第1の実施の形態の磁気検出素子の製造方法を説明するための工程図であり、製造過程にある磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た断面図である。

【0139】例えば、磁気検出素子が浮上式ヘッドを構成する場合には、セラミック材のスライダのトレーリング端面上にAl₂O₃膜などの絶縁膜を介して下部シールド層を積層する。

【0140】図1に示される工程では、下地層13上に、第1反強磁性層14を積層する。さらに第1固定磁

性層15a、非磁性中間層15b、第2固定磁性層15cからなるシンセティックフェリピンド型の固定磁性層15が積層され、固定磁性層15の上層に非磁性材料層16、フリー磁性層17、非磁性層18まで積層された多層膜A1を、スパッタ法や蒸着法などの薄膜形成プロセスによって、同一真空成膜装置中で連続成膜する。

【0141】下地層13はTaなどからなる。なお、下地層13と第1反強磁性層14の間にあるいは下地層13に代えて、NiFeCrやCrを用いてシード層を形成してもよい。前記シード層は第1反強磁性層14の結晶配向を整えるためのものである。

【0142】第1反強磁性層14は、PtMn合金、または、X-Mn（ただしXは、Pd, Ir, Rh, Ru, Os, Ni, Feのいずれか1種または2種以上の元素である）合金で、あるいはPt-Mn-X'（ただしX'は、Pd, Ir, Rh, Ru, Au, Ag, Os, Cr, Ni, Ar, Ne, Xe, Krのいずれか1種または2種以上の元素である）合金で形成する。

【0143】これらの合金は、成膜直後の状態では、不規則系の面心立方構造（fcc）であるが、熱処理によってCuAuI型の規則型の面心正方構造（fct）に構造変態する。

【0144】第1反強磁性層14の膜厚は、トラック幅方向の中心付近において8～30nmである。

【0145】第1固定磁性層15a及び第2固定磁性層15cは、強磁性材料により形成されるもので、例えばNiFe合金、Co、CoNiFe合金、CoFe合金、CoNi合金などにより形成されるものであり、特にNiFe合金、CoFe合金、またはCoにより形成されることが好ましい。また、第1固定磁性層15a及び第2固定磁性層15cは同一の材料で形成されることが好ましい。

【0146】また、非磁性中間層15bは、非磁性材料により形成されるもので、Ru, Rh, Ir, Os, Cr, Re, Cuのうち1種またはこれらの2種以上の合金で形成されている。特にRuによって形成されることが好ましい。

【0147】非磁性材料層16は、固定磁性層15とフリー磁性層17との磁気的な結合を防止し、またセンス電流が主に流れる層であり、Cu, Cr, Au, Agなど導電性を有する非磁性材料により形成されることが好ましい。特にCuによって形成されることが好ましい。

【0148】フリー磁性層17は、拡散防止層（中間層）17a及び磁性層17bからなるものである。拡散防止層17aは、強磁性材料からなるもので、例えばCoやCoFeから形成される。この拡散防止層17aは、磁性層17bと非磁性材料層16の相互拡散を防止するためのものである。また、磁性層17bは、強磁性材料により形成されるもので、例えばNiFe合金、Co、CoFeNi合金、CoFe合金、CoNi合金な

どにより形成される。なお、フリー磁性層 17 は単層の磁性層として形成されてもよい。

【0149】また本実施の形態のように拡散防止層 17a が形成されている場合には、フリー磁性層 17 の磁性層 17b は以下の組成を有する磁性材料で形成することが好ましい。CoFeNi 合金であって Fe の組成比が 7 原子%以上で 15 原子%以下、Ni の組成比が 5 原子%以上で 15 原子%以下、残りの組成比は Co である磁性材料。

【0150】これによりフリー磁性層 17 と強磁性層 19、19 間で発生する RKKY 相互作用における交換結合磁界を強くすることができ、スピントロニック磁界 (H_{sf}) を約 293 (kA/m) にまで大きくすることができる。

【0151】また上記した組成範囲内であると、フリー磁性層 17 の磁性層 17b と強磁性層 19 の磁歪を -3×10^{-6} から 3×10^{-6} の範囲内に収めることができ、また保磁力を 790 (A/m) 以下に小さくできる。

【0152】さらに、フリー磁性層 17 の軟磁気特性の向上、磁性層 17b の Ni が拡散防止層 17a や非磁性材料層 16 に拡散することによる抵抗変化量 (ΔR) や抵抗変化率 ($\Delta R/R$) の低減の抑制を適切に図ることが可能である。

【0153】なお、フリー磁性層 17 が単層の磁性層として形成される場合には、フリー磁性層 17 は、組成式が CoFeNi で示され、Fe の組成比は 9 原子%以上で 17 原子%以下で、Ni の組成比は 0.5 原子%以上で 10 原子%以下で、残りの組成は Co である強磁性材料で形成されることが好ましい。

【0154】非磁性層 18 は、Ru、Rh、Ir、Re、Os のうち 1 種あるいは 2 種以上の合金で形成する。なお、非磁性層 18 を Ru によって形成するときには、非磁性層の膜厚 t_1 を 0.8 ~ 1.1 nm、より好ましくは 0.85 ~ 0.9 nm、となるようものとして形成すると強磁性層 19 とフリー磁性層 17 との間の RKKY 相互作用を大きくすることができるので好ましい。

【0155】次に、非磁性層 18 まで積層された多層膜 A1 を第 1 の熱処理温度、Y 方向を向いた第 1 の大きさの磁界中で、第 1 の磁場中アニールを行い、第 1 反強磁性層 14 と第 1 固定磁性層 15a との間に交換異方性磁界を発生させ、固定磁性層 15 の磁化方向を図示 Y 方向に固定する。本実施の形態では、第 1 の熱処理温度を 270℃、磁界の第 1 の大きさを 800 k (A/m) としている。

【0156】次に、図 2 に示されるように強磁性層 19、第 2 反強磁性層 20 をスパッタ法によって連続成膜し、下地層 13 から第 2 反強磁性層 20 まで積層された多層膜 A2 を得る。

【0157】強磁性層 19 の材料は、フリー磁性層 17

の磁性層 17b と同様の材料を用いる。従って、例えば NiFe 合金、Co、CoNiFe 合金、CoFe 合金、CoNi 合金などにより形成される。特に、強磁性層 19 は、組成式が CoFeNi で示され、Fe の組成比は 9 原子%以上で 17 原子%以下で、Ni の組成比は 0.5 原子%以上で 10 原子%以下で、残りの組成は Co である強磁性材料で形成されることが好ましい。

【0158】また、第 2 反強磁性層 20 の材料は、第 1 反強磁性層 14 の材料と同じである。

【0159】本実施の形態のように、非磁性層 18 を Ru、Rh、Ir、Re、Os のうち 1 種あるいは 2 種以上の合金で形成すると、第 1 の磁場中アニールにおいて、非磁性層 18 の表面がほとんど酸化しない。従って、非磁性層 18 上に強磁性層 19 をスパッタ成膜する前に、非磁性層 18 の表面をミリングなどで処理しなくても、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 との間に非磁性層 18 を介した RKKY 相互作用を働かせることができる。例えばフリー磁性層 17 と強磁性層 19 をともに NiFe で形成し、非磁性層 18 を Ru で形成した場合、非磁性層 18 の表面をミリングなどで処理しなくても 42 (kA/m) の一方向異方性磁界を発生させることができる。

【0160】すなわち、非磁性層 18 と強磁性層 19、19 との界面を、ミリングによって削られた面としなくともすむようにできるので、フリー磁性層 17 の磁化方向を一定方向に揃えるための一方向異方性磁界の低下を防ぐことができる。

【0161】ただし、強磁性層 19 とフリー磁性層 17 は、非磁性層 18 を介した RKKY 相互作用によって磁氣的に結合されたものであるため、非磁性層 18 の表面をミリングによって処理した場合でも、フリー磁性層の磁化方向を一定方向に揃えるために十分な一方向異方性磁界を得ることができる。

【0162】さらに、非磁性層 18 を Ru で形成し、フリー磁性層 17 を CoFe で形成するとフリー磁性層 17 の磁歪を 0 にすることも可能である。

【0163】なお、本実施の形態の磁気検出素子は、第 1 反強磁性層 14 と第 2 反強磁性層 20 を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成することができる。

【0164】次に、多層膜 A2 を第 2 の熱処理温度、X 方向を向いた第 2 の大きさの磁界中で、第 2 の磁場中アニールにかけて、第 2 反強磁性層 20 と強磁性層 19 との間に交換異方性磁界を発生させ、強磁性層 19 の磁化方向を図示 X 方向に固定する。本実施の形態では、第 2 の熱処理温度を 250℃、磁界の第 2 の大きさを 8 (kA/m) としている。

【0165】第 2 反強磁性層 20 と強磁性層 19 との間の交換異方性磁界は、第 2 の磁場中アニール工程において初めて生じる。従って、第 1 反強磁性層 14 と第 1 固定磁性層 15a との間の交換異方性磁界の方向を図示 Y

方向に向けたまま、第2反強磁性層20と強磁性層19との間の交換異方性磁界を図示X方向に向けるためには、第2の熱処理温度を、第1反強磁性層14による交換結合磁界が消失するブロック温度より低い温度に設定し、第2の磁界の大きさを第1反強磁性層14と第1固定磁性層15aとの間の交換異方性磁界より小さくするだけでよい。また、第2の磁場中アニールをこれらの条件下で行えば、第1反強磁性層14と第2反強磁性層20を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成しても、第1反強磁性層14と第1固定磁性層15aとの間の交換異方性磁界の方向を図示Y方向に向けたまま、第2反強磁性層20と強磁性層19との間の交換異方性磁界を図示X方向に向けることができる。すなわち、フリー磁性層17の磁化方向を、固定磁性層15の磁化方向と直交する方向に固定することが容易になる。

【0166】なお、第2の磁場中アニール時の第2の磁界の大きさは、フリー磁性層17及び強磁性層19の飽和磁界、及びフリー磁性層17及び強磁性層19の反磁界より大きく、フリー磁性層17と強磁性層19との間の反平行結合が崩れるスピントロポ磁界より小さいことが好ましい。

【0167】次に、図3に示す工程では、トラック幅分より若干広い領域を覆うリフトオフ用のレジスト層R1を積層する。レジスト層R1には、その下面に切り込み部R1a、R1aが形成されている。なお、図示していないが、第2反強磁性層20の上層にTa、Crなどからなる保護層を形成してもよい。

【0168】さらに図23に示す工程によって、第2反強磁性層20の上層に電極層21、21を成膜する。本実施の形態では、電極層21、21の成膜の際に使用されるスパッタ法は、イオンビームスパッタ法、ロングスロースパッタ法、あるいはコリメーションスパッタ法のいずれか1種以上であることが好ましい。なお、第2の磁場中アニールによって第2反強磁性層20または第2反強磁性層20上に形成された保護層が酸化したときは、第2反強磁性層20の表面または前記保護層の表面をイオンミリングなどによって削り、酸化した部分を除去する。

【0169】本実施の形態では、多層膜A2が形成された基板（ウェハ）を、電極層21、21の組成で形成されたターゲットに対し垂直方向に置き、これにより例えばイオンビームスパッタ法を用いることで、前記多層膜A2の表面に対し垂直方向から電極層21、21を成膜する。

【0170】レジスト層R1の切り込み部R1a、R1a付近には、スパッタ粒子が積層されにくい。従って、レジスト層R1の切り込み部R1a、R1a付近では、電極層21、21は膜厚が薄く形成され、電極層21、21に曲面状の側端面21a、21aが形成される。電極層21、21は、例えば、Au、Rh、W、Cr、T

aなどを用いて成膜される。なお、レジスト層R1上には、電極層21、21と同じ組成の層21bが形成される。電極層21、21を成膜した後、レジスト層R1を除去すると、図4に示す状態になる。

【0171】さらに、図5に示すように、電極層21、21をマスクとして、第2反強磁性層20の電極層21、21によって覆われていない部分を、イオンミリングまたは反応性イオンエッチング（RIE）などによって、削り込むことにより、側面22aが第2反強磁性層20及び強磁性層19を貫通し、底面22bが非磁性層18内に位置し、かつ底面22bがトラック幅Twに相当する幅寸法を有する凹部22を形成する。凹部22の側面22a、22aは、電極層21、21の側端面21a、21aと連続面となる傾斜面または曲面となっている。図5では、凹部22の底面22bが非磁性層18内に位置するように、凹部22を形成している。

【0172】凹部22の形成後、上部ギャップ層23及び上部シールド層24を形成して図6に示されるような磁気検出素子を得ることができる。

【0173】なお、下部シールド層11及び上部シールド層24は、NiFeなどの強磁性材料を用いて形成される。なお、下部シールド層11及び上部シールド層24はメッキによって形成されてもよい。また、下部シールド層11及び上部シールド層24は磁化容易軸方向がトラック幅方向を向いていることが好ましい。

【0174】下部ギャップ層12及び上部ギャップ層23は、Al₂O₃、SiO₂、Al-Si-Oなどの絶縁性材料によって形成されている。

【0175】本実施の形態では、電極層21、21は第2反強磁性層20、20上に積層され、電極層21、21のトラック幅領域C側の側端面21a、21aが、第2反強磁性層20、20のトラック幅領域C側の側端面20a、20aと連続面となっている。さらに、強磁性層19、19のトラック幅領域C側の側端面19a、19aも、電極層21、21の側端面21a、21a及び第2反強磁性層20、20の側端面20a、20aと連続面となっている。

【0176】なお、図6において、トラック幅領域Cとは、凹部22の底面22bに重なる領域であり、フリー磁性層17の磁化が変動する領域である感度領域Eに等しい。

【0177】本実施の形態では、第2反強磁性層20、20の下層にある強磁性層19、19が、第2反強磁性層20、20との磁氣的結合によってトラック幅方向（図示X方向）に磁化方向がそろえられ、さらに、この強磁性層19、19の下層に非磁性層18を介して形成されたフリー磁性層17の両側部の磁化方向が、強磁性層19、19とのRKKY相互作用によって、強磁性層19の磁化方向と反平行方向に揃えられる。すなわち、第2反強磁性層20、20の下層において強磁性層1

9, 19、非磁性層 18、及びフリー磁性層 17 がシンセティックフェリ構造となっており、フリー磁性層 17 の第 2 反強磁性層 20, 20 及び強磁性層 19, 19 に重なる領域である両側部 17 s, 17 s は磁化方向が固定磁性層 15 の磁化方向と交叉する方向に固定されている。

【0178】一方、フリー磁性層 17 の第 2 反強磁性層 20, 20 及び強磁性層 19, 19 に重ならない領域である中央部（トラック幅領域）17 c の磁化方向は、外部磁界が与えられない状態のときは両側部 17 s, 17 s 10 17 s にならってトラック幅方向と 180° 異なる反平行方向（図示 X 方向と反平行方向）を向き、外部磁界がトラック幅方向に垂直な方向（ハイト方向；図示 Y 方向）に与えられると、ハイト方向へ向けて変化する。

【0179】このフリー磁性層 17 の中央部 17 c での磁化の方向の変動と、固定磁性層 15 の固定磁化方向との関係で電気抵抗が変化し（これを磁気抵抗効果という）、この電気抵抗値の変化に基づく電圧変化又は電流変化により、記録媒体からの洩れ磁界などの外部磁界が検出される。

【0180】本実施の形態では、凹部 22 の底面 22 b の幅寸法がトラック幅 Tw を規定する。凹部 22 の底面 22 b の幅寸法は、図 3 に示した工程において、レジスト層 R1 の寸法を調節すること及び図 5 の工程において凹部 22 の深さ寸法を調節することにより規定することができる。

【0181】なお、凹部 22 の側面 22 a, 22 a の第 2 反強磁性層 20 の表面 20 b に対する垂直方向に対する傾斜角は約 20° である。

【0182】第 2 反強磁性層 20, 20 はトラック幅領域 C から外れた全領域において、反強磁性を発生するために十分な膜厚を有し、トラック幅領域 C から外れた全領域（トラック幅方向の両側端部 S, S）において強磁性層 19, 19 及びフリー磁性層 17 の磁化方向を確実に固定することができる。すなわち、強磁性層 19, 19 19 の下層に非磁性層 18 を介して積層されているフリー磁性層 17 の磁化方向は、トラック幅方向の両側部 17 s, 17 s でのみ強磁性層 19, 19 との RKKY 相互作用により固定される。

【0183】凹部 22 の底面 22 b に重なるフリー磁性層 17 の領域 E は、外部磁界が印加されない状態において、磁化方向が固定された両側部 17 s, 17 s にならって図示 X 方向と反平行方向に揃えられ、外部磁界が印加されるとその磁化方向が変化する。

【0184】従って、磁気検出素子のトラック幅寸法 Tw は、凹部 22 の底面 22 b 幅寸法 Tw によって決定され、しかも、トラック幅寸法 Tw から外れた領域で記録信号を読み取ってしまうサイドリーディングを防止することができる。上述したように、本発明では、凹部 22 は一様の厚さで成膜された第 2 反強磁性層 20 を、電極

層 21, 21 をマスクとした反応性イオンエッチング

(RIE) やイオンミリングを用いて、正確な幅寸法で凹部 22 の底面 22 b を形成することが可能になる。すなわち、磁気検出素子のトラック幅寸法 Tw を正確に規定でき、磁気検出素子の光学的トラック幅が磁氣的トラック幅に等しくなり、不感領域が生じないので、高記録密度化に対応するために磁気検出素子の光学的トラック幅 Tw を小さくしていった場合の再生出力の低下を抑えることができる。

【0185】また、図 6 に示される磁気検出素子では、フリー磁性層 17 を第 2 反強磁性層 20, 20 及び強磁性層 19, 19 の下層にまで延して形成するので、フリー磁性層 17 の磁化がフリー磁性層 17 の両側端面の表面磁荷によって発生する反磁界の影響を受けることを小さくできる。

【0186】また、第 2 反強磁性層 20, 20 の下層において強磁性層 19, 19、非磁性層 18、及びフリー磁性層 17 がシンセティックフェリ構造となっているので、フリー磁性層 17 の両側部 17 s, 17 s における磁化方向を一定方向に揃えるための一方向異方性磁界を大きくすることができる。

【0187】従って、外部磁界によってフリー磁性層 17 の両側部 17 s, 17 s の磁化方向が変化してしまい、結果として磁氣的トラック幅が大きくなることを抑えることができる。

【0188】また、第 2 反強磁性層 20, 20 と強磁性層 19, 19 との交換結合磁界が比較的弱くても、フリー磁性層 17 の磁化方向を確実に、固定磁性層 15 の磁化方向と交叉する方向に揃えることが容易になる。従って、前記第 2 の磁場中アニールにおける磁場の大きさを 8 (kA/m) の低磁場とすることができ、固定磁性層 15 の磁化方向が変化するのを抑えることが容易になる。なお、第 2 の磁界の大きさを 8 (kA/m) としても、例えばフリー磁性層 17 と強磁性層 19 をともに NiFe で形成し、非磁性層 18 を Ru で形成した場合に 56 (kA/m) の一方向異方性磁界を発生させることができる。また、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 をともに CoFe で形成し、非磁性層 18 を Ru で形成した場合に 152 (kA/m) の一方向異方性磁界を発生させることができる。

【0189】また、本実施の形態では、非磁性層 18 を一定の厚さ t1 で形成するので、非磁性層 18 の上面 18 a が平坦面となる。従って、図 2 に示される工程において、強磁性層 19 及び第 2 反強磁性層 20 を、表面が平坦面である非磁性層 18 上に積層することになるので、強磁性層 19 及び第 2 反強磁性層 20 も平坦化された層として形成でき、強磁性層 19、非磁性層 18、及びフリー磁性層 17 からなるシンセティックフェリ構造において強磁性層 19 とフリー磁性層 17 間の RKKY 相互作用を大きくすることが容易になる。

【0190】また非磁性層 18 の上面 18a が平坦面であると、強磁性層 19, 19 及び第 2 反強磁性層 20, 20 の積層工程の制御が容易になる。従って、強磁性層 19, 19 の膜厚を薄くでき強磁性層 19, 19、非磁性層 18、及びフリー磁性層 17 からなるシンセティックフェリ構造において強磁性層 19, 19 とフリー磁性層 17 間のスピントロニック磁界を大きくできる。本実施の形態では強磁性層 19, 19 の膜厚を例えば 1.5 nm ~ 4.0 nm にできる。また、フリー磁性層 17 にかかる一方向異方性磁界を大きくできる。例えば、強磁性層 19, 19 及びフリー磁性層 17 を NiFe で形成したときには、前記一方向異方性磁界を 56 (kA/m) とすることができる。または、強磁性層 19, 19 及びフリー磁性層 17 を CoFe で形成したときには、前記一方向異方性磁界を 152 (kA/m) とすることができる。

【0191】なお、図 1 の工程で、非磁性層 18 を Ru などの導電性材料で形成すると、非磁性層 18 が、以下に説明するスピントロニック効果を有するバックド層として機能し、磁気検出素子の磁界検出感度を向上させることができる。

【0192】スピントロニック効果について説明する。図 19 及び図 20 はスピントロニック型磁気検出素子においてバックド層によるスピントロニック効果を説明するための模式説明図であり、図 19 はバックド層がない構造例を示す模式図であり、図 20 はバックド層のある構造例を示す模式図である。

【0193】巨大磁気抵抗 GMR 効果は、主として電子の「スピンに依存した散乱」によるものである。つまり磁性材料、ここではフリー磁性層の磁化方向に平行なスピン（例えばアップスピン）を持つ伝導電子の平均自由行程 λ^+ と、磁化方向に逆平行なスピン（例えばダウンスピン）を持つ伝導電子の平均自由行程 λ^- の差を利用したものである。図 19 及び図 20 では、アップスピンを持つ伝導電子を上向き矢印で表わし、ダウンスピンを持つ伝導電子を下向き矢印で表わしている。電子がフリー磁性層 115 を通り抜けようとするときに、この電子がフリー磁性層 115 の磁化方向に平行なアップスピンを持てば自由に移動できるが、反対にダウンスピンを持ったときには直ちに散乱されてしまう。

【0194】これは、アップスピンを持つ電子の平均自由行程 λ^+ が、例えば、50 オングストローム程度であるのに対して、ダウンスピンを持つ電子の平均自由行程 λ^- が 6 オングストローム程度であり、10 分の 1 程度と極端に小さいためである。フリー磁性層 115 の膜厚は、6 オングストローム程度であるダウンスピンを持つ電子の平均自由行程 λ^- よりも大きく、50 オングストローム程度であるアップスピンを持つ電子の平均自由行程 λ^+ よりも小さく設定されている。

【0195】従って、電子がフリー磁性層 115 を通り

抜けようとするときに、この電子がフリー磁性層 115 の磁化方向に平行なアップスピンを持てば自由に移動できるが、反対にダウンスピンを持ったときには直ちに散乱されてしまう（フィルタアウトされる）。

【0196】固定磁性層 113 で発生し、非磁性材料層 114 を通過するダウンスピン電子は、フリー磁性層 115 と非磁性材料層 114 との界面付近或いは固定磁性層 113 と非磁性材料層 114 との界面付近で散乱され、フリー磁性層 115 にはほとんど到達しない。つまり、このダウンスピン電子は、フリー磁性層 115 の磁化方向が回転しても平均自由行程に変化はなく、GMR 効果による抵抗変化率に影響しない。従って GMR 効果にはアップスピン電子の挙動のみを考えればよい。

【0197】固定磁性層 113 で発生したアップスピン電子はこのアップスピン電子の平均自由行程 λ^+ より薄い厚さの非磁性材料層 114 中を移動し、フリー磁性層 115 に到達し、アップスピン電子はフリー磁性層 115 内を自由に通過できる。これは、アップスピン電子がフリー磁性層 115 の磁化方向に平行なスピンを持っているためである。

【0198】固定磁性層 113 の磁化方向とフリー磁性層 115 の磁化方向が反平行となる状態では、アップスピン電子はフリー磁性層 115 の磁化方向に平行なスピンを持った電子でなくなる。すると、アップスピン電子は、フリー磁性層 115 と非磁性材料層 114 との界面付近で散乱されることになり、アップスピン電子の有効平均自由行程が急激に減少する。すなわち、抵抗値が増大する。抵抗変化率は、アップスピン電子の有効平均自由行程の変化量と正の相関関係を有する。

【0199】図 20 に示すように、バックド層 B₁ が設けられている場合には、フリー磁性層 115 を通過したアップスピン電子はバックド層 B₁ において、このバックド層 B₁ の材料で決定される追加平均自由行程 $\lambda^+ b$ を移動した後散乱する。すなわち、バックド層 B₁ を設けたことにより、アップスピン電子の平均自由行程 λ^+ が追加平均自由行程 $\lambda^+ b$ 分だけ延びる。

【0200】バックド層として機能する非磁性層 18 を有する本実施の形態では、アップスピンの伝導電子の平均自由行程を伸ばすことができる。このため、外部磁界の印加によるアップスピン電子の平均自由行程の変化量が大きくなって、スピントロニック型磁気検出素子の磁気抵抗変化率 ($\Delta R/R$) をより向上させることができる。

【0201】スピントロニック効果によるアップスピンの伝導電子とダウンスピンの伝導電子の平均自由行程差の拡大はフリー磁性層 17 の膜厚が比較的薄い場合により効果を発揮する。

【0202】フリー磁性層 17 の膜厚が 1.5 nm より薄いとき強磁性材料層として機能するように形成することが難しくなり十分な磁気抵抗効果を得ることができない。また、鏡面反射 (specular reflection) せずに通

常の散乱 (diffusive scattering) をする伝導電子も存在するため、抵抗変化率が低下してしまうので好ましくない。

【0203】また、フリー磁性層 17 の膜厚が 4.5 nm より厚いと非磁性層 18 に到達する前に散乱されてしまうアップスピンの伝導電子が増加してスピンフィルター効果によって抵抗変化率が変化する割合が減少するため好ましくない。

【0204】また、図 6 では、単位面積あたりの磁気モーメントが異なる前記第 1 固定磁性層 15a (強磁性材料層) と前記第 2 固定磁性層 15c (強磁性材料層) が、前記非磁性中間層 15b を介して積層されたものが、一つの固定磁性層 15 として機能する。すなわち、固定磁性層 15 は、単位面積あたりの磁気モーメントの大きさが異なる複数の強磁性材料層が、非磁性中間層を介して積層され、前記非磁性中間層を介して隣接する前記強磁性材料層の磁化方向が反平行となるフェリ磁性状態であるものである。

【0205】第 1 固定磁性層 15a は第 1 反強磁性層 14 と接して形成され、第 1 の磁場中アニールが施されることにより、第 1 固定磁性層 15a と第 1 反強磁性層 14 との界面にて交換結合による交換異方性磁界が生じ、第 1 固定磁性層 15a の磁化方向が図示 Y 方向に固定される。第 1 固定磁性層 15a の磁化方向が図示 Y 方向に固定されると、非磁性中間層 15b を介して対向する第 2 固定磁性層 15c の磁化方向が、第 1 固定磁性層 15a の磁化方向と反平行の状態に固定される。

【0206】なお、第 1 固定磁性層 15a の磁気モーメントと第 2 固定磁性層 15c の磁気モーメントを足し合わせた合成磁気モーメントの方向が固定磁性層 15 の磁化方向となる。

【0207】このように、第 1 固定磁性層 15a と第 2 固定磁性層 15c の磁化方向は、反平行となるフェリ磁性状態になっており、第 1 固定磁性層 15a と第 2 固定磁性層 15c とが互いに他方の磁化方向を固定しあうので、全体として固定磁性層 15 の磁化方向を一定方向に安定させることができるので好ましい。

【0208】第 1 固定磁性層 15a 及び第 2 固定磁性層 15c は、強磁性材料により形成されるもので、例えば NiFe 合金、Co、CoNiFe 合金、CoFe 合金、CoNi 合金などにより形成されるものであり、特に NiFe 合金、Co または CoFe により形成されることが好ましい。また、第 1 固定磁性層 15a 及び第 2 固定磁性層 15c は同一の材料で形成されることが好ましい。図 1 では、前記第 1 固定磁性層 15a 及び前記第 2 固定磁性層 15c を同じ材料を用いて形成し、さらに、それぞれの膜厚を異ならせることにより、それぞれの単位面積あたりの磁気モーメントを異ならせている。

【0209】また、非磁性中間層 15b は、非磁性材料により形成されるもので、Ru、Rh、Ir、Os、C

r、Re、Cu のうち 1 種またはこれらの 2 種以上の合金で形成されている。特に Ru によって形成されることが好ましい。

【0210】固定磁性層 15 が非磁性中間層 15b の上下に第 1 固定磁性層 15a 及び第 2 固定磁性層 15c が積層されたものとして形成されると、第 1 固定磁性層 15a 及び第 2 固定磁性層 15c が互いの磁化方向を固定しあい、全体として固定磁性層 15 の磁化方向を一定方向に強力に固定することができる。すなわち、第 1 反強磁性層 14 と固定磁性層 15 との交換結合磁界 H_{ex} を、例えば 80~160 kA/m と、大きな値として得ることができる。

【0211】また、本実施の形態では、固定磁性層 15 の固定磁化による反磁界 (双極子磁界) を、第 1 固定磁性層 15a 及び第 2 固定磁性層 15c の静磁界どうしが相互に打ち消し合うことによりキャンセルできる。これにより、固定磁性層 15 の固定磁化による反磁界 (双極子磁界) からの、フリー磁性層 17 の変動磁化への寄与を減少させることができる。

【0212】従って、フリー磁性層 17 の変動磁化の方向を所望の方向に補正することがより容易になり、アシメトリの小さい対称性の優れた磁気検出素子を得ることが可能になる。

【0213】また、固定磁性層 15 の固定磁化による反磁界 (双極子磁界) H_d は、フリー磁性層 17 の素子高さ方向において、その端部で大きく中央部で小さいという不均一な分布を持ち、フリー磁性層 17 内における単磁区化が妨げられる場合があるが、固定磁性層 15 を上記の積層構造とすることにより双極子磁界 H_d をほぼ $H_d = 0$ とすることができ、これによってフリー磁性層 17 内に磁壁ができて磁化の不均一が発生しバルクハウゼンノイズなどが発生することを防止することができる。

【0214】ただし、固定磁性層 15 が単層の強磁性材料層として形成されてもよい。また、第 2 固定磁性層 15c と非磁性材料層 16 の間に Co などからなる拡散防止層が形成されていてもよい。この拡散防止層は第 2 固定磁性層 15c と非磁性材料層 16 の相互拡散を防止する。

【0215】また、本実施の形態では、第 1 反強磁性層 14 と第 2 反強磁性層 20、20 を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成した場合でも、第 1 反強磁性層 14 の交換異方性磁界の方向を図示 Y 方向に向けたまま、第 2 反強磁性層 20、20 の交換異方性磁界を図示 X 方向に向けることができる。すなわち、本実施の形態では、フリー磁性層 17 の磁化方向を、固定磁性層 15 の磁化方向と直交する方向に固定できる。

【0216】なお、フリー磁性層 17 と強磁性層 19、19 の単位面積あたりの磁気モーメントの大きさは異なっている必要がある。フリー磁性層 17 及び強磁性層 19、19 の単位面積あたりの磁気モーメントの大きさ

は、強磁性材料層の飽和磁化 (M_s) と膜厚 (t) の積で表される。本実施の形態では、強磁性層 19, 19 の膜厚をフリー磁性層 17 の膜厚より薄くしている。強磁性層 19, 19 の膜厚を薄くすると強磁性層 19, 19 の一方向異方性磁界が大きくなってフリー磁性層 17 に十分な縦バイアスをかけることが容易になる。

【0217】また図4に示された工程の後、電極層 21, 21 をマスクとして第2反強磁性層 20 を第2反強磁性層 20 内まで掘り込むことにより、図7に示されるような凹部 30 を有する磁気検出素子を得ることもできる。凹部 30 は底面 30b が第2反強磁性層 20 内に位置し、かつ底面 30b がトラック幅寸法 T_w であるものである。

【0218】図7に示される磁気検出素子では、凹部 30 の底面 30b が第2反強磁性層 20 内に位置しており、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 が、非磁性層 18 を介して隣接し、フリー磁性層 17 の磁化方向と強磁性層 19 の磁化方向が反平行となるフェリ磁性状態となる。

【0219】このとき、フリー磁性層 17、非磁性層 18 及び強磁性層 19 からなる多層膜 F がひとつのフリー磁性層、いわゆるシンセティックフェリフリー磁性層として機能する。シンセティックフェリフリー磁性層では、フリー磁性層の膜厚を薄くすることと同等の効果が得られ、フリー磁性層の磁化が変動しやすくなり、磁気抵抗効果素子の磁界検出感度が向上する。なお、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 の単位面積あたりの磁気モーメントの大きさは異なっている必要がある。フリー磁性層 17 の単位面積あたりの磁気モーメントの大きさは、磁性層 17b の飽和磁化 (M_s) と膜厚 (t) の積と拡散防止層 17a の飽和磁化 (M_s) と膜厚 (t) の積の和であり、強磁性層 19 の単位面積あたりの磁気モーメントの大きさは、強磁性層の飽和磁化 (M_s) と膜厚 (t) の積で表される。

【0220】なお、凹部 30 の底面 30b の下部に位置する第2反強磁性層 20 の領域の厚さ t_2 を 0Å より大きく 50Å 以下にすると、凹部 30 の底面 30b の下部に位置する第2反強磁性層 20 の領域では強磁性層 19 との間に交換結合磁界が発生しないので好ましい。

【0221】また図4に示された工程の後、電極層 21, 21 をマスクとして第2反強磁性層 20 を強磁性層 19 内まで掘り込むことにより、図8に示されるような凹部 31 を有する磁気検出素子を得ることもできる。凹部 31 は、側面 31a が第2反強磁性層 20 を貫通し、底面 31b が強磁性層 19 内に位置し、かつ底面 31b がトラック幅 T_w に相当する幅寸法を有するものである。

【0222】図8に示された磁気検出素子でもフリー磁性層 17、非磁性層 18 及び強磁性層 19 からなる多層膜 F がひとつのフリー磁性層、いわゆるシンセティック

フェリフリー磁性層 F として機能する。本発明では、フリー磁性層の外部磁化によって磁化方向が変化する感度領域 E の上層に第2反強磁性層 20 が全く存在しない。従って、シンセティックフェリフリー磁性層 F の感度領域 E の磁化方向の外部磁界依存性の変動を鋭敏にでき、磁気検出素子の磁界検出感度を向上できる。

【0223】本発明の第4の実施の形態の磁気検出素子の製造方法を説明する。磁気検出素子が浮上式ヘッドを構成する場合には、セラミック材のスライダのトレーリング端面上に A1:O:膜などの絶縁膜を介して下部シールド層及び下部ギャップ層を積層する。

【0224】さらに、前述した第1の実施の形態と同様に、図1に示される工程において下地層 13 上に、第1反強磁性層 14、第1固定磁性層 15a、非磁性中間層 15b、第2固定磁性層 15c からなるシンセティックフェリピンド型の固定磁性層 15、非磁性材料層 16、フリー磁性層 17、非磁性層 18 まで順次積層された多層膜 A1 を、スパッタ法や蒸着法などの薄膜形成プロセスによって、同一真空成膜装置中で連続成膜する。

【0225】次に、第1の熱処理温度、Y 方向を向いた第1の大きさの磁界中で、第1の磁場中アニールを行い、第1反強磁性層 14 と第1固定磁性層 15a との間に交換異方性磁界を発生させ、固定磁性層 15 の磁化方向を図示 Y 方向に固定する。本実施の形態では、第1の熱処理温度を 270°C 、磁界の第1の大きさを $800\text{k}(\text{A/m})$ としている。

【0226】次に、強磁性層 19、第2反強磁性層 20 をスパッタ法によって連続成膜し、図2に示される下地層 13 から第2反強磁性層 20 まで積層された多層膜 A2 を得る。

【0227】なお、下地層 13、第1反強磁性層 14、第1の固定磁性層 15a、非磁性中間層 15b、第2固定磁性層 15c からなるシンセティックフェリピンド型の固定磁性層 15、非磁性材料層 16、フリー磁性層 17、非磁性層 18、強磁性層 19、第2反強磁性層 20 の材料は、前述した第1の実施の形態と同じであるので説明を省略する。

【0228】本実施の形態でも、非磁性層 18 を Ru、Rh、Ir、Re、Os のうち1種あるいは2種以上の合金で形成すると、第1の磁場中アニールにおいて、非磁性層 18 の表面がほとんど酸化しない。従って、非磁性層 18 上に強磁性層 19 をスパッタ成膜する前に、非磁性層 18 の表面をミリングなどで処理しなくても、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 との間に非磁性層 18 を介した RKKY 相互作用を働かせることができる。

【0229】すなわち、非磁性層 18 と強磁性層 19、19 との界面を、ミリングによって削られた面としなくてもすむようにできるので、フリー磁性層 17 の磁化方向を一定方向に揃えるための一方向異方性磁界の低下を防ぐことができる。

【0230】ただし、強磁性層 19 とフリー磁性層 17 は、非磁性層 18 を介した RKKY 相互作用によって磁氣的に結合されたものであるので、非磁性層 18 の表面をミリングによって処理した場合でも、フリー磁性層の磁化方向を一定方向に揃えるために十分な一方向異方性磁界を得ることができる。

【0231】なお、本実施の形態でも、第 1 反強磁性層 14 と第 2 反強磁性層 20 を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成することができる。

【0232】次に、多層膜 A2 を第 2 の熱処理温度、X 10 方向を向いた第 2 の大きさの磁界中で、第 2 の磁場中アニールにかけて、第 2 反強磁性層 20 と強磁性層 19 との間に交換異方性磁界を発生させ、強磁性層 19 の磁化方向を図示 X 方向に固定する。本実施の形態では、第 2 の熱処理温度を 250℃、磁界の第 2 の大きさを 8 (kA/m) としている。

【0233】第 2 反強磁性層 20 と強磁性層 19 との間の交換異方性磁界は、第 2 の磁場中アニール工程において初めて生じる。従って、第 1 反強磁性層 14 と第 1 固定磁性層 15a との間の交換異方性磁界の方向を図示 Y 20 方向に向けたまま、第 2 反強磁性層 20 と強磁性層 19 との間の交換異方性磁界を図示 X 方向に向けるためには、第 2 の熱処理温度を、第 1 反強磁性層 14 による交換結合磁界が消失するブロッキング温度より低い温度に設定し、第 2 の磁界の大きさを第 1 反強磁性層 14 と第 1 固定磁性層 15a との間の交換異方性磁界より小さくするだけでよい。また、第 2 の磁場中アニールをこれらの条件下で行えば、第 1 反強磁性層 14 と第 2 反強磁性層 20 を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成しても、第 1 反強磁性層 14 と第 1 固定磁性層 15a との間の交換 30 異方性磁界の方向を図示 Y 方向に向けたまま、第 2 反強磁性層 20 と強磁性層 19 との間の交換異方性磁界を図示 X 方向に向けることができる。すなわち、フリー磁性層 17 の磁化方向を、固定磁性層 15 の磁化方向と直交する方向に固定することが容易になる。

【0234】なお、第 2 の磁場中アニール時の第 2 の磁界の大きさは、フリー磁性層 17 及び強磁性層 19 の飽和磁界、及びフリー磁性層 17 及び強磁性層 19 の反磁界より大きく、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 との間の反平行結合が崩れるスピントロップ磁界より小さいこ 40 とが好ましい。

【0235】次に、図 9 に示す工程において、第 2 反強磁性層 20 上に、トラック幅 Tw に等しい間隔 W1 をあけて一対の第 1 のレジスト層 R2、R2 を積層する。

【0236】第 1 のレジスト層 R2、R2 の積層後、図 10 に示すように、第 2 反強磁性層 20 の第 1 のレジスト層 R2、R2 によって挟まれた部位、すなわち、第 2 反強磁性層 20 の第 1 のレジスト層 R2、R2 によってマスクされない部位を、イオンミリングまたは反応性イ 50 オンエッチング (RIE) などによって、第 2 反強磁性

層 20 の表面 20a に対する垂直方向、すなわちトラック幅方向 (図示 X 方向) に対する垂直方向 (図示 Z 方向) に削り込むことにより、側面 31a が第 2 反強磁性層 20 及び強磁性層 19 を貫通し、底面 31b が非磁性層 18 内に位置し、かつ底面 31b がトラック幅 Tw に相当する幅寸法を有する凹部 31 を形成する。凹部 31 の側面 31a、31a は、トラック幅方向に対して垂直面になっている。図 10 では、凹部 31 の底面 31b が非磁性層 18 内に位置するように、凹部 31 を形成している。凹部 31 の形成後、第 1 のレジスト層 R2、R2 を除去する。

【0237】次に、凹部 31 内及び凹部 31 の開口部周辺の第 2 反強磁性層 20、20 上に、トラック幅方向の幅寸法が W2 の領域を覆う第 2 のレジスト層 R3 を形成する。レジスト層 R3 はリフトオフ用のレジスト層であり、下層部に切り欠き部 R3a、R3a が形成されている。

【0238】さらに、図 11 に示されるように第 2 反強磁性層 20、20 のレジスト層 R3 に覆われていない領域上に導電性材料からなる電極層 26、26 をスパッタ法によって成膜して多層膜 A3 を形成する。電極層 26、26 の形成後、第 2 のレジスト層 R3 を除去すると図 12 に示される磁気検出素子を得ることができる。

【0239】図 12 に示される磁気検出素子では、第 2 反強磁性層 20、20 上に積層されている電極層 26、26 のトラック幅領域 C 側の側端縁 26a、26a が、第 2 反強磁性層 20、20 のトラック幅領域 C 側の側端面 20a、20a よりも、多層膜 A3 の外端部 S1、S1 側に形成される磁気検出素子を得ることができる。なお、トラック幅領域 C とは、多層膜 A3 中の凹部 31 の底面 31b に重なる領域のことである。すなわち、トラック幅領域 C の幅寸法はトラック幅寸法 Tw に等しい。また、トラック幅領域 C の幅寸法は、フリー磁性層 17 の磁化方向が変化する領域である感度領域 E の幅寸法に等しい。

【0240】電極層 26、26 のトラック幅領域 C 側の側端縁 26a、26a が第 2 反強磁性層 20、20 のトラック幅領域 C 側の側端面 20a、20a よりも、多層膜 A3 の外端部 S1、S1 側に形成されていると凹部 31 の底面 31b と電極層 26、26 及び第 2 反強磁性層 20、20 がつくる段差をなだらかにすることができる。従って、磁気検出素子の上層の上部ギャップ層 23 の膜厚を小さくしても、この段差上に上部ギャップ層 23 が確実に形成されるようにできる。すなわち、上部シールド層 24 と電極層 26、26、第 2 反強磁性層 20、20、強磁性層 19、19、及び非磁性層 18 との間の電氣的短絡をより確実に防止でき、狭ギャップ化に対応できるようになる。

【0241】また、多層膜 A3 のトラック幅領域 C の両側近傍における上部シールド層 24 と下部シールド層 1

1間の距離が大きくなると、上部シールド層24と下部シールド層11の間を通過して、検出対象の記録トラックの両側の記録トラックから発生する記録媒体からの磁界が磁気検出素子に侵入しやすくなり、実効トラック幅が大きくなる。すなわち、記録トラック間のクロストークが発生しやすくなる。

【0242】本発明では、前述のように凹部31と電極層26、26及び第2反強磁性層20、20とがつくる段差をなだらかにすることができるので、トラック幅領域Cの両側近傍における上部シールド層24と下部シールド層11間の距離が大きくなることを抑え、実効トラック幅を小さくすることができる。

【0243】具体的には、強磁性層19、19、第2反強磁性層20、20、電極層26、26のうち、強磁性層19、19及び第2反強磁性層20、20のみと重なる領域S2、S2における上部シールド層24と下部シールド層11間の距離をG1s、多層膜A3の中央C1と重なる位置における上部シールド層24と下部シールド層11間の距離をG1cとしたときに、前記G1sとG1cの差の値を、 $G1c \leq G1s \leq G1c + 90 \text{ nm}$ を満たす範囲に設定することが好ましい。より好ましくは、前記G1sと前記G1cの値を、 $G1c \leq G1s \leq G1c + 70 \text{ nm}$ を満たす範囲に設定することである。さらに好ましくは、前記G1sと前記G1cの値を、 $G1c \leq G1s \leq G1c + 30 \text{ nm}$ を満たす範囲に設定することである。

【0244】あるいは、前記G1sと前記G1cの値を、 $1.00 \leq G1s / G1c \leq 2.50$ を満たす範囲に設定することが好ましい。より好ましくは、前記G1sと前記G1cの値を、 $1.00 \leq G1s / G1c \leq 2.17$ を満たす範囲に設定することである。さらに好ましくは、前記G1sと前記G1cの値を、 $1.00 \leq G1s / G1c \leq 1.50$ を満たす範囲に設定することである。

【0245】本発明の第5の実施の形態の磁気検出素子の製造方法を説明する。磁気検出素子が浮上式ヘッドを構成する場合には、セラミック材のスライダのトレーリング端面上にAl₂O₃膜などの絶縁膜を介して下部シールド層及び下部ギャップ層を積層する。

【0246】さらに、前述した第1の実施の形態と同様に、図1に示される工程において、下地層13、第1反強磁性層14、第1固定磁性層15a、非磁性中間層15b、第2固定磁性層15cからなるシンセティックフェリピンド型の固定磁性層15、非磁性材料層16、フリー磁性層17、非磁性層18まで順次積層された多層膜A1を、スパッタ法や蒸着法などの薄膜形成プロセスによって、同一真空成膜装置中で連続成膜する。

【0247】次に、第1の熱処理温度、Y方向を向いた第1の大きさの磁界中で、第1の磁場中アニールを行い、第1反強磁性層14と第1固定磁性層15aとの間

に交換異方性磁界を発生させ、固定磁性層15の磁化方向を図示Y方向に固定する。本実施の形態では、第1の熱処理温度を270℃、磁界の第1の大きさを800k(A/m)としている。

【0248】次に、強磁性層19、第2反強磁性層20をスパッタ法によって連続成膜し、図2に示される下地層13から第2反強磁性層20まで積層された多層膜A2を得る。

【0249】なお、下地層13、第1反強磁性層14、第1固定磁性層15a、非磁性中間層15b、第2固定磁性層15cからなるシンセティックフェリピンド型の固定磁性層15、非磁性材料層16、フリー磁性層17、非磁性層18、強磁性層19、第2反強磁性層20の材料は、前述した第1の実施の形態と同じであるので説明を省略する。

【0250】本実施の形態でも、非磁性層18をRu、Rh、Ir、Re、Osのうち1種あるいは2種以上の合金で形成すると、第1の磁場中アニールにおいて、非磁性層18の表面がほとんど酸化しない。従って、非磁性層18上に強磁性層19をスパッタ成膜する前に、非磁性層18の表面をミリングなどで処理しなくても、フリー磁性層17と強磁性層19との間に非磁性層18を介したRKKY相互作用を働かせることができる。

【0251】すなわち、非磁性層18と強磁性層19との界面を、ミリングによって削られた面としなくてもすむようにできるので、フリー磁性層17の磁化方向を一定方向に揃えるための一方向異方性磁界の低下を防ぐことができる。

【0252】ただし、強磁性層19とフリー磁性層17は、非磁性層18を介したRKKY相互作用によって磁氣的に結合されたものである。非磁性層18の表面をミリングによって処理した場合でも、フリー磁性層17の磁化方向を一定方向に揃えるために十分な一方向異方性磁界を得ることができる。

【0253】なお、本実施の形態でも、第1反強磁性層14と第2反強磁性層20を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成することができる。

【0254】次に、多層膜A2を第2の熱処理温度、X方向を向いた第2の大きさの磁界中で、第2の磁場中アニールにかけて、第2反強磁性層20と強磁性層19との間に交換異方性磁界を発生させ、強磁性層19の磁化方向を図示X方向に固定する。本実施の形態では、第2の熱処理温度を250℃、磁界の第2の大きさを8(kA/m)としている。

【0255】第2反強磁性層20と強磁性層19との間の交換異方性磁界は、第2の磁場中アニール工程において初めて生じる。従って、第1反強磁性層14と第1固定磁性層15aとの間の交換異方性磁界の方向を図示Y方向に向けたまま、第2反強磁性層20と強磁性層19との間の交換異方性磁界を図示X方向に向けるために

は、第2の熱処理温度を、第1反強磁性層14による交換結合磁界が消失するブロッキング温度より低い温度に設定し、第2の磁界の大きさを第1反強磁性層14と第1固定磁性層15aとの間の交換異方性磁界より小さくするだけでよい。また、第2の磁場中アニールをこれらの条件下で行えば、第1反強磁性層14と第2反強磁性層20を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成しても、第1反強磁性層14と第1固定磁性層15aとの間の交換異方性磁界の方向を図示Y方向に向けたまま、第2反強磁性層20と強磁性層19との間の交換異方性磁界を図示X方向に向けることができる。すなわち、フリー磁性層17の磁化方向を、固定磁性層15の磁化方向と直交する方向に固定することが容易になる。

【0256】なお、第2の磁場中アニール時の第2の磁界の大きさは、フリー磁性層17及び強磁性層19の飽和磁界、及びフリー磁性層17及び強磁性層19の反磁界より大きく、フリー磁性層17と強磁性層19との間の反平行結合が崩れるスピントロップ磁界より小さいことが好ましい。

【0257】次に、図9に示す工程において、第2反強磁性層20上に、トラック幅Twに等しい間隔W1をあけて一対の第1のレジスト層R2、R2を積層する。

【0258】第1のレジスト層R2、R2の積層後、図10に示すように、第2反強磁性層20の第1のレジスト層R2、R2によって挟まれた部位、すなわち、第2反強磁性層20の第1のレジスト層R2、R2によってマスクされない部位を、イオンミリングまたは反応性イオンエッチング(RIE)などによって、第2反強磁性層20の表面(側端面)20aに対する垂直方向、すなわちトラック幅方向(図示X方向)に対する垂直方向(図示Z方向)に削り込むことにより凹部31を形成する。凹部31の側面31a、31aは、トラック幅方向に対して垂直面になっている。図10では、凹部31の底面31bが非磁性層18内に位置するように、凹部31を形成している。凹部31の形成後、第1のレジスト層R2、R2を除去する。

【0259】次に、図13に示されるように、底面R4aのトラック幅方向の幅寸法W3がレジスト層R1の底面R1bの幅寸法W1よりも小さいリフトオフ用の第2のレジスト層R4を、凹部31の底面31b上に形成する。

【0260】次に、図14に示されるように、凹部31の底面31bの第2のレジスト層R4に覆われていない領域上及び第2反強磁性層20、20上に電極層27、27をスパッタ法によって成膜することにより多層膜A4を形成する。

【0261】なお、スパッタの入射角度を調節して、電極層27、27のトラック幅領域C側の側端縁27a、27aを、凹部31の底面31bと第2のレジスト層R4が接合しているところまで延して形成することによ

り、第2反強磁性層20、20上に積層される電極層27、27のトラック幅領域C側の側端縁27a、27aが、強磁性層19、19のトラック幅領域C側の側端縁(側端面)19a、19a及び第2反強磁性層20、20のトラック幅領域C側の側端縁(側端面)20a、20aよりも多層膜A4の中央部C1側に延されて形成されるようにできる。なお、図14においてトラック幅領域Cとは、電極層27、27の側端縁27a、27aに挟まれる領域である。

【0262】このとき、レジスト層R4の底面R4aのトラック幅方向寸法W3と電極層27、27の側端縁27a、27a間距離は等しくなる。なお、電極層27、27の側端縁27a、27a間距離が磁気検出素子のトラック幅寸法Twを規定する。このトラック幅寸法Twの領域、すなわち、トラック幅領域Cが実質的に磁気抵抗効果を発揮し得る領域である感度領域Eである。

【0263】電極層27、27の成膜後、第2のレジスト層R4を除去すると、図15に示されるように多層膜A4が得られる。

【0264】なお、本実施の形態の磁気検出素子は、第1反強磁性層14と第2反強磁性層20を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成することができる。

【0265】なお、第2反強磁性層20と電極層27、27の間にTaなどの非磁性材料からなる保護層を成膜してもよい。

【0266】多層膜A4上に上部ギャップ層23及び上部シールド層24を積層して図15に示される磁気検出素子を得る。

【0267】強磁性層19、19及び第2反強磁性層20、20は、電極層27、27に比べて比抵抗が大きい材料によって形成される。電極層27、27が強磁性層19、19及び第2反強磁性層20、20上のみに積層されると、電極層27、27に供給された直流電流は強磁性層19、19及び第2反強磁性層20、20を介して非磁性層18、フリー磁性層17、非磁性材料層、及び固定磁性層15に流れることになり、磁気検出素子の直流抵抗値が大きくなってしまふ。

【0268】電極層27、27のトラック幅領域C側の側端縁27a、27aが、強磁性層19、19のトラック幅領域C側の側端縁(側端面)19a、19a及び第2反強磁性層20、20のトラック幅領域C側の側端縁(側端面)20a、20aよりも多層膜A4の中央部C1側に延されていると、電極層27、27の側端縁27a、27aを非磁性層18上にまで延長でき、電極層27、27に供給された直流電流を強磁性層19、19及び第2反強磁性層20、20を介さずに流すことができるので、磁気検出素子の直流抵抗値を小さくできる。

【0269】なお、図15の磁気検出素子のトラック幅Twは、一対の電極層27、27のトラック幅領域C側の側端縁27a、27a間距離で規定されるので、第2

の反強磁性層 20、20 のトラック幅領域 C 側の側端縁（側端面）20a、20a 付近の領域で組成が変化したりだれが生じたりすることによって、第 2 の反強磁性層 20、20 の側端縁（側端面）20a、20a 付近に重なるフリー磁性層 17 の両側部 17s、17s の磁化方向が動きやすくなっても、トラック幅 Tw が変化することを抑えることができる。

【0270】なお、前述した図 10 の工程では、凹部 31 を底面 31b が非磁性層 18 内に位置するように形成しているが、本発明では底面が第 2 反強磁性層 20 内または強磁性層 19 内に位置するような凹部を形成してもよい。

【0271】また、図 1 に示された工程において、多層膜 A1 を形成するときに、非磁性層 18 とフリー磁性層 17 の間に、非磁性層 18 よりも比抵抗が低い材料、例えば Cu からなる導電性材料層 50 を形成し、最終的に図 16 に示される磁気検出素子が得られるようにしてもよい。

【0272】比抵抗が非磁性層 18 よりも低い導電性材料からなる導電性材料層 50 が形成されていると、非磁性層 18 だけの場合よりも大きなスピントラップ効果を奏することができるようになり、磁気検出素子の磁界検出感度をさらに向上させることができるので好ましい。なお、導電性材料層 50 を Cu を用いて形成すると、NiFe や CoFeNi によって形成されたフリー磁性層 17 と結晶格子定数の値が近くなり、大きなスピントラップ効果を奏することができる。

【0273】導電性材料層 50 を形成するときには、例えば非磁性層 18 を Ru によって膜厚 t_3 が 0.4 ~ 1.1 nm であるものとして形成し、さらに、導電性材料層 50 を Cu によって膜厚 t_4 が 0.3 ~ 0.5 nm であるものとして形成することができる。

【0274】また、図 1 に示された工程において、多層膜 A1 を形成するときに、フリー磁性層 40 を、単位面積あたりの磁気モーメントの大きさが異なる第 1 フリー磁性層 40a（強磁性材料層）及び第 2 フリー磁性層 40c（強磁性材料層）を非磁性中間層 40b を介して積層された、いわゆるシンセティックフェリフリー型のフリー磁性層として形成し、最終的に図 17 に示される磁気検出素子を得るようにしてもよい。

【0275】図 17 に示される磁気検出素子は、フリー磁性層が、単位面積あたりの磁気モーメントの大きさが異なる複数の強磁性材料層が、非磁性層を介して積層され、非磁性層を介して隣接する強磁性材料層の磁化方向が反平行となるフェリ磁性状態であるものである。

【0276】第 1 フリー磁性層 40a は拡散防止層（中間層）40a1 と磁性層 40a2 からなっている。この拡散防止層 40a1 は、例えば Co または CoFe からなるものであり、磁性層 40a2 と非磁性材料層 16 の相互拡散を防止する。

【0277】第 1 フリー磁性層 40a 及び第 2 フリー磁性層 40c は、強磁性材料により形成されるもので、例えば NiFe 合金、Co、CoNiFe 合金、CoFe 合金、CoNi 合金などにより形成されるものであり、特に NiFe 合金により形成されることが好ましい。

【0278】また、非磁性中間層 40b は、非磁性材料により形成されるもので、Ru、Rh、Ir、Os、Cr、Re、Cu のうち 1 種あるいは 2 種以上の合金で形成されている。特に Ru によって形成されることが好ましい。

【0279】なお、第 1 フリー磁性層 40a 及び第 2 フリー磁性層 40c は、それぞれの単位面積あたりの磁気モーメントが異なるように形成されている。単位面積あたりの磁気モーメントは、飽和磁化 (M_s) と膜厚 (t) の積で表される。

【0280】本実施の形態では、第 1 フリー磁性層 40a と非磁性材料層 16 の間に、拡散防止層 40a1 が形成されているので、磁性層 40a2 の単位面積あたりの磁気モーメントと拡散防止層 40a1 の単位面積あたりの磁気モーメントの和と、第 2 フリー磁性層 40c の単位面積あたりの磁気モーメントを異ならせる。

【0281】なお、第 2 フリー磁性層 40c の厚さは 0.5 ~ 2.5 nm の範囲であることが好ましい。また、第 1 フリー磁性層 40a の厚さは 2.5 ~ 4.5 nm の範囲であることが好ましい。なお、第 1 フリー磁性層 40a の厚さが 3.0 ~ 4.0 nm の範囲であることがより好ましく、さらに好ましくは 3.5 ~ 4.0 nm の範囲であることである。第 1 フリー磁性層 40a の厚さが前記の範囲を外れると、スピントラップ型磁気検出素子の磁気抵抗変化率を大きくすることができなくなるので好ましくない。

【0282】図 4 では、単位面積あたりの磁気モーメントが異なる第 1 フリー磁性層 40a と第 2 フリー磁性層 40c が、非磁性中間層 40b を介して積層されたものが、一つのフリー磁性層 40 として機能する。

【0283】第 1 フリー磁性層 40a と第 2 フリー磁性層 40c の磁化方向は 180 度異なる反平行のフェリ磁性状態になっている。このとき、第 1 フリー磁性層 40a の磁化方向が、強磁性層 19 から発生する磁界の方向に向き、第 2 フリー磁性層 40c の磁化方向が、180 度反対方向に向いた状態になる。

【0284】第 1 フリー磁性層 40a と第 2 フリー磁性層 40c の磁化方向が 180 度異なる反平行のフェリ磁性状態になると、フリー磁性層 40 の膜厚を薄くすることと同等の効果が得られ、実効的な磁氣的膜厚 ($M_s \times t$) が小さくなり、フリー磁性層 40 の磁化が変動しやすくなって、磁気抵抗効果素子の磁界検出感度が向上する。

【0285】第 1 フリー磁性層 40a の単位面積あたりの磁気モーメントと第 2 フリー磁性層 40c の単位面積

あたりの磁気モーメントを足し合わせた単位面積あたりの合成磁気モーメントの方向がフリー磁性層 40 の磁化方向となる。

【0286】ただし、固定磁性層 15 の磁化方向との関係で出力に寄与するのは第 1 フリー磁性層 40 a の磁化方向のみである。

【0287】また、第 1 フリー磁性層 40 a と第 2 フリー磁性層 40 c の磁気的膜厚の関係が異ならされていると、フリー磁性層 40 のスピントロップ磁界を大きくできる。

【0288】スピントロップ磁界とは、磁化方向が反平行である 2 つの磁性層に対し、外部磁界を印加したときに、2 つの磁性層の磁化方向が反平行でなくなる外部磁界の大きさを指す。

【0289】フリー磁性層 40 のヒステリシスループの概念図として図 18 を示す。この M-H 曲線は、図 17 に示す構成のフリー磁性層 40 に対してトラック幅方向から外部磁界を印加したときの、フリー磁性層 40 の磁化 M の変化を示したものである。

【0290】また、図 18 中、F1 で示す矢印は、第 1 フリー磁性層 40 a の磁化方向を表わし、F2 で示す矢印は、第 2 フリー磁性層 40 c の磁化方向を表わす。

【0291】図 18 に示すように、外部磁界が小さいときは、第 1 フリー磁性層 40 a と第 2 フリー磁性層 40 c がフェリ磁性状態、すなわち矢印 F1 及び F2 の方向が反平行になっているが、外部磁界 H の大きさがある値を越えると、第 1 フリー磁性層 40 a と第 2 フリー磁性層 40 c の RKKY 結合が壊され、フェリ磁性状態を保てなくなる。これが、スピントロップ転移である。またこのスピントロップ転移が起きるときの外部磁界の大きさがスピントロップ磁界であり、図 18 では H_{sf} で示している。なお、図中 H_{cf} は、フリー磁性層 40 の磁化の保磁力を示している。

【0292】第 1 フリー磁性層 40 a 及び第 2 フリー磁性層 40 c の、それぞれの単位面積あたりの磁気モーメントが異なるように形成されているとフリー磁性層 40 のスピントロップ磁界 H_{sf} が大きくなる。これにより、フリー磁性層 40 がフェリ磁性状態を保つ磁界の範囲が広くなり、フリー磁性層 40 のフェリ磁性状態の安定度が増す。

【0293】また本実施の形態のように拡散防止層 40 a1 が形成されている場合には、フリー磁性層を構成する第 1 フリー磁性層の磁性層 40 a2 及び第 2 フリー磁性層 40 c は以下の組成を有する磁性材料で形成することが好ましい。前記 CoFeNi 合金であって Fe の組成比が 7 原子%以上で 15 原子%以下、Ni の組成比が 5 原子%以上で 15 原子%以下、残りの組成比は Co である。

【0294】これにより第 1 フリー磁性層 40 a と第 2 フリー磁性層 40 c 間で発生する RKKY 相互作用にお

ける交換結合磁界を強くすることができる。具体的には、反平行状態が崩れるときの磁界、すなわちスピントロップ磁界 (H_{sf}) を約 293 (kA/m) にまで大きくすることができる。

【0295】よって、強磁性層 19 の下に位置する第 1 フリー磁性層 40 a 及び第 2 フリー磁性層 40 c の両側端部の磁化を適切に反平行状態にピン止めでき、サイドリーディングの発生を抑制することができる。

【0296】なお第 1 フリー磁性層 40 a 及び第 2 フリー磁性層 40 c の双方を前記 CoFeNi 合金で形成することが好ましい。これにより、より安定して高いスピントロップ磁界を得ることができ、第 1 フリー磁性層 40 a と第 2 フリー磁性層 40 c とを適切に反平行状態に磁化できる。

【0297】また上記した組成範囲内であると、第 1 フリー磁性層 40 a と第 2 フリー磁性層 40 c の磁歪を -3×10^{-6} から 3×10^{-6} の範囲内に収めることができ、また保磁力を 790 (A/m) 以下に小さくできる。

【0298】さらに、フリー磁性層 40 の軟磁気特性の向上、非磁性材料層 16 間での Ni の拡散による抵抗変化量 (ΔR) や抵抗変化率 ($\Delta R/R$) の低減の抑制を適切に図ることが可能である。

【0299】なお、第 1 フリー磁性層 40 a が磁性層 40 a2 のみからなり、拡散防止層 40 a1 が形成されないときには、組成式が CoFeNi で示され、Fe の組成比は 9 原子%以上で 17 原子%以下で、Ni の組成比は 0.5 原子%以上で 10 原子%以下で、残りの組成は Co である磁性材料を用いて磁性層 40 a2 及び第 2 フリー磁性層 40 c を形成することが好ましい。

【0300】なお、前述した全ての磁気検出素子において、非磁性層 18 とフリー磁性層 17 の間に、非磁性層 18 よりも比抵抗が低い材料からなる導電性材料層 50 を形成してもよい。また、前述した全ての磁気検出素子のフリー磁性層 17 をシンセティックフェリフリー型のフリー磁性層として形成してもよい。

【0301】図 12、図 15、図 16、図 17 に示された磁気検出素子でも、凹部 31 の側面 31a、31a 及び凹部 22 の側面 22a、22a をトラック幅方向に対して垂直面となるようにすることが可能である。すなわち、トラック幅領域 C から外れた全領域において、第 2 反強磁性層 20、20 が反強磁性を発生するために十分な膜厚を有することができ、トラック幅領域 C から外れた全領域においてフリー磁性層 17 の磁化方向を確実に固定することができる。

【0302】従って、磁気検出素子のトラック幅領域 C (感度領域 E) でのみフリー磁性層 17 の磁化方向を動かすことができ、トラック幅領域 C 周辺におけるサイドリーディングを防止することができる。

【0303】また、フリー磁性層 17 を第 2 反強磁性層

20, 20及び強磁性層19, 19の下層にまで延して形成するので、フリー磁性層17の磁化がフリー磁性層17の両側端面の表面磁荷によって発生する反磁界の影響を受けることを小さくできる。

【0304】また、第2反強磁性層20, 20の下層において強磁性層19, 19、非磁性層18、及びフリー磁性層17がシンセティックフェリ構造となっているので、フリー磁性層17の両側部17s, 17sにおける磁化方向を一定方向に揃えるための一方向異方性磁界を大きくすることができる。

【0305】従って、外部磁界によってフリー磁性層17の両側部17s, 17sの磁化方向が変化してしまい、結果として磁氣的トラック幅が大きくなることを抑えることができる。

【0306】また、第2反強磁性層20, 20と強磁性層19, 19との交換結合磁界が比較的弱くても、フリー磁性層17の磁化方向を確実に、固定磁性層15の磁化方向と交叉する方向に揃えることが容易になる。従って、前記第2の磁場中アニールにおける磁場の大きさを8000A/mの低磁場とすることができ、固定磁性層15の磁化方向が変化することを抑えることが容易になる。

【0307】また、本実施の形態では、図2に示される工程において、強磁性層19及び第2反強磁性層20を、表面が平坦面である非磁性層18上に積層しているので、強磁性層19及び第2反強磁性層20も平坦化された層として形成でき、強磁性層19、非磁性層18、及びフリー磁性層17からなるシンセティックフェリ構造において強磁性層19とフリー磁性層17間のRKKY相互作用を大きくすることが容易になる。

【0308】また、非磁性層18の上面18aが平坦面であると、強磁性層19, 19及び第2の反強磁性層20, 20の積層工程の制御が容易になる。従って、強磁性層19, 19の膜厚を薄くでき強磁性層19, 19、非磁性層18、及びフリー磁性層17からなるシンセティックフェリ構造において強磁性層19, 19とフリー磁性層17間のスピフロップ磁界を大きくできる。本実施の形態では強磁性層19, 19の膜厚を例えば1.5nm~4.0nmにできる。また、フリー磁性層17にかかる一方向異方性磁界を大きくできる。例えば、強磁性層19, 19及びフリー磁性層17をNiFeで形成したときには、前記一方向異方性磁界を56(kA/m)とすることができ、または、強磁性層19, 19及びフリー磁性層17をCoFeで形成したときには、前記一方向異方性磁界を152(kA/m)とすることができる。

【0309】なお、非磁性層18をRuなどの導電性材料で形成すると、非磁性層18が、スピフィルター効果を有することになり、磁気検出素子の磁界検出感度を向上させることができる。

【0310】ところで図1ないし図17では、固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層を有する多層膜のトラック幅方向（図示X方向）の両側部S, S上に電極層21, 26, 27が設けられ、前記電極層21, 26, 27から前記多層膜内に流れる電流が、前記多層膜内を各層の膜面に対して平行な方向に流れるCIP (current in the plane) 型の磁気検出素子の製造方法を説明した。

【0311】一方、図21以降で説明する磁気検出素子の製造方法は、前記多層膜の上下に電極層が設けられ、前記電極層から前記多層膜内に流れる電流が、前記多層膜の各層の膜面に対し垂直方向に流れるCPP (current perpendicular to the plane) 型の磁気検出素子の製造方法である。

【0312】まず、図21では、基板上（図示せず）にNiFeなどの磁性材料からなり下部シールド層を兼ねる下部電極層70を形成し、その上に図1で形成したのと同じ多層膜A1を形成する。

【0313】その後、多層膜A1を第1の熱処理温度、Y方向を向いた第1の大きさの磁界中で、第1の磁場中アニールを行い、第1の反強磁性層14と第1の固定磁性層15aとの間に交換異方性磁界を発生させ、固定磁性層15の磁化方向を図示Y方向に固定する。本実施の形態では、前記第1の熱処理温度を270℃、磁界の第1の大きさを800k (A/m)としている。

【0314】図1の説明をしたときに述べたように、非磁性層18は、Ru、Rh、Ir、Re、Osのうち1種あるいは2種以上の合金で形成する。なお、非磁性層18をRuによって形成するときには、非磁性層の膜厚t1を0.8~1.1nm、より好ましくは0.85~0.9nm、となるようものとして形成すると強磁性層19とフリー磁性層17との間のRKKY相互作用を大きくすることができるので好ましい。

【0315】次に、図22に示すごとく、非磁性層18上に、強磁性層19を再成膜し、さらに強磁性層19上に第2の反強磁性層20、絶縁層71を連続成膜する。

【0316】絶縁層71は、例えばAl₂O₃、SiO₂、AlN、TiO₂、Ti₂O₃、Al-Si-Oなどの絶縁材料で形成される。

【0317】次に絶縁層71まで形成された多層膜B1を、第2の熱処理温度、X方向を向いた第2の大きさの磁界中で、第2の磁場中アニールにかけて、第2の反強磁性層20と強磁性層19との間に、交換異方性磁界を発生させ、強磁性層19の磁化方向を図示X方向と180°異なる反平行方向に固定する。強磁性層19の磁化方向が図示X方向と180°異なる反平行方向に固定されると、フリー磁性層17の磁化方向は非磁性層18を介した強磁性層19とのRKKY相互作用によって、図示X方向に固定される。本実施の形態では、前記第2の熱処理温度を250℃、磁界の第2の大きさを24k

(A/m) としている。

【0318】フリー磁性層 17 と強磁性層 19 の磁化方向が上述のような関係になるのは、フリー磁性層 17 の単位面積当りの磁気モーメントが強磁性層 19 の単位面積当りの磁気モーメントより大きく、磁界の第 2 の大きさがフリー磁性層 17 と強磁性層 19 間のスピントロニック磁界よりも小さいためである。

【0319】第 2 の反強磁性層 20 による交換異方性磁界は、第 2 の磁場中アニール工程において初めて生じる。従って、第 1 の反強磁性層 14 による交換異方性磁界の方向を図示 Y 方向に向けたまま、第 2 の反強磁性層 20 による交換異方性磁界を図示 X 方向と 180° 異なる反平行方向に向けるためには、前記第 2 の熱処理温度を、第 1 の反強磁性層 14 による交換結合磁界が消失するブロッキング温度より低い温度に設定し、前記第 2 の磁界の大きさを第 1 の反強磁性層 14 による交換異方性磁界より小さくするだけでよい。また、第 2 の磁場中アニールをこれらの条件下で行えば、第 1 の反強磁性層 14 と第 2 の反強磁性層 20 を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成しても、第 1 の反強磁性層 14 による交換異方性磁界の方向を図示 Y 方向に向けたまま、第 2 の反強磁性層 20 による交換異方性磁界を図示 X 方向と反平行方向に向けることができる。すなわち、フリー磁性層 17 の磁化方向を、固定磁性層 15 の磁化方向と直交する方向に固定することが容易になる。

【0320】なお、第 2 の磁場中アニール時の第 2 の磁界の大きさは、フリー磁性層 17 及び強磁性層 19 の飽和磁界、及びフリー磁性層 17 及び強磁性層 19 の反磁界より大きく、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 間の反平行結合が崩れるスピントロニック磁界より小さいことが好ましい。

【0321】次に、絶縁層 71 の上に露光現像によってトラック幅方向（図示 X 方向）の中央部に穴部 90a が設けられたレジスト層 90 を形成する。レジスト層 90 の内側端面 90b は、絶縁層 71 の表面（または基板表面）に対する垂直面である。ただし、内側端面 90b は下面から上面にかけて徐々に穴部 90a のトラック幅方向への間隔が広がる傾斜面あるいは湾曲面で形成されてもよい。

【0322】次に図 24 に示す矢印 F 方向からのイオンミリングまたは反応性イオンエッチング（RIE）によってレジスト層 90 に覆われていない絶縁層 71、第 2 の反強磁性層 20、強磁性層 19 を完全に削り込み、非磁性層 18 を途中まで削り込む。図 24 では、多層膜に形成された凹部 31 の側面 31a は絶縁層 71 の表面

（または基板表面）に対する垂直面である。そして、レジスト層 90 を除去する。

【0323】なおレジスト層 90 の内側端面 90b が傾斜面あるいは湾曲面であるとき又はイオンミリングにおけるイオンビーム入射角が垂直方向から傾いているとき

には、前記イオンミリングによる削り込みによって多層膜に形成された凹部 31 の側面 31a も傾斜面あるいは湾曲面として形成される。

【0324】本実施の形態では、ベタ膜状態で成膜された絶縁層 71 上にレジスト層 90 を形成した上で、レジスト層 90 をマスクとしてイオンミリングまたは反応性イオンエッチング（RIE）を行っている。しかし、図 22 工程で形成される絶縁層 71 をベタ膜の状態で成膜する代わりに、第 2 反強磁性層 20 または第 2 反強磁性層 20 の上に形成される Ta などからなる保護層上のトラック幅方向（図示 X 方向）の中央部に、リフトオフ用のレジスト層を形成した上で、絶縁層 71 と同じ絶縁性材料をスパッタ成膜し、その後前記レジストを除去してトラック幅方向（図示 X 方向）の中央部に穴部が設けられた絶縁層を形成してもよい。この場合、この前記穴部が設けられた絶縁層をマスクとしてイオンミリングまたは反応性イオンエッチング（RIE）により、第 2 反強磁性層及び強磁性層 19 を削って凹部を形成する。

【0325】なお、前記第 2 の磁場中アニールは、多層膜 B1 に凹部 31 を形成した後行う方が好ましい。

【0326】図 25 に示す工程では、絶縁層 71 上から前記凹部 31 の側面 31a 及び底面 31b にかけて Al、 SiO_2 、 SiO 、 AlN あるいは TiC などの絶縁材料からなる他の絶縁層 72 をスパッタ成膜する。スパッタ法には、イオンビームスパッタ法、ロングスロースパッタ法、コリメーションスパッタ法などを使用できる。

【0327】ここで注意すべき点は、他の絶縁層 72 を形成する際のスパッタ角度 θ_1 にある。図 25 に示すようにスパッタ方向 G は、多層膜の各層の膜面の垂直方向に対し θ_1 のスパッタ角度を有しているが本発明では前記スパッタ角度 θ_1 をできる限り大きくして（すなわちより寝かせて）、凹部 31 の側面 31a に他の絶縁層 72 が成膜されやすいようにすることが好ましい。例えば前記スパッタ角度 θ_1 は 50° から 70° である。

【0328】このように前記スパッタ角度 θ_1 を大きくすることで、凹部 31 の側面 31a に形成される他の絶縁層 72 のトラック幅方向（図示 X 方向）への膜厚 t_{z1} を、絶縁層 71 の上面及び凹部 31 の底面 31b に形成される他の絶縁層 72 の膜厚 t_{z2} よりも厚く形成できる。このように他の絶縁層 72 の膜厚を調整しないと次工程でのイオンミリングで、凹部 31 の側面 31a の他の絶縁層 72 がすべて除去されてしまい、あるいは他の絶縁層 72 が残ってもその膜厚は非常に薄くなり、適切に分流ロスを低減させるための絶縁層として機能させることができない。

【0329】次に図 26 に示すように多層膜の各層の膜面と垂直方向（図示 X 方向と垂直方向）あるいは垂直方向に近い角度（多層膜の各層表面の垂直方向に対し 0° から 20° の角度からイオンミリングを施す。このとき凹部 31 の底面 31b に形成された他の絶縁層 72 を適

切に除去するまでイオンミリングを施す。このイオンミリングによって絶縁層 71 の上面 71a に形成された他の絶縁層 72 も除去される。一方、凹部 31 の側面 31a に形成された他の絶縁層 72 も若干削れるものの、凹部 31 の底面 31b に形成された他の絶縁層 72 よりも厚い膜厚 t_{z1} を有し、しかもイオンミリングのミリング方向 H は、凹部 31 の側面 31a に形成された他の絶縁層 72 から見ると浅い入射角度になるため、凹部 31 の側面 31a に形成された他の絶縁層 72 は、凹部 31 の底面 31b に形成された他の絶縁層 72 に比べて削られ難く、よって凹部 31 の側面 31a には適度な膜厚の他の絶縁層 72 が残される。

【0330】凹部 31 の側面 31a に残される他の絶縁層 72 のトラック幅方向における膜厚 t_{z3} は 5 nm から 10 nm であることが好ましい。

【0331】図 26 に示すように第 2 の反強磁性層 20 上面は絶縁層 71 によって覆われ、また凹部 31 の側面 31a は他の絶縁層 72 によって覆われた状態になっている。そして、図 27 に示すように、絶縁層 71、72 から凹部 31 の底面 31b にかけて、NiFe などの磁性材料からなり上部シールド層を兼ねる上部電極層 73 をメッキ形成する。

【0332】以上のようにして図 28 に示される磁気検出素子が形成される。図 28 に示される磁気検出素子は、第 2 の反強磁性層 20 上を絶縁層 71 によって、また凹部 31 の側面 31a 上を適切に他の絶縁層 72、72 によって覆うことができ、シールド層から流れる電流が、第 2 反強磁性層 20 等に分流せず、前記電流は前記凹部 31 の底面 31b 上の他の絶縁層 72、72 間の間隔で決定されるトラック幅 Tw 内を適切に流れる。よって図 28 に示す構造の磁気検出素子であれば、電流経路が、他の絶縁層 72、72 のトラック幅方向の間隔で決まるトラック幅 Tw から広がることを抑制でき再生出力が大きく、実効トラック幅が狭い CPP 型の磁気検出素子を製造することが可能になる。

【0333】さらに、上部電極層 73 は、フリー磁性層 17 から下地層 13 までの多層膜に対する電流経路が、凹部 31 によって絞り込まれるので、多層膜の両側部に電流が分流することを適切に抑制でき、より効果的に再生出力の大きい磁気検出素子を製造することが可能になる。

【0334】また図 23 に示された工程の後、第 2 反強磁性層 20 を第 2 反強磁性層 20 の途中まで掘り込むことにより、図 29 に示されるような凹部 32 を有する磁気検出素子を得ることもできる。凹部 32 は底面 32b が第 2 反強磁性層 20 内に位置するものである。

【0335】図 29 に示される磁気検出素子では、凹部 32 の底面 32b が第 2 反強磁性層 20 内に位置しており、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 が、非磁性層 18 を介して隣接し、フリー磁性層 17 の磁化方向と強磁性

層 19 の磁化方向が反平行となるフェリ磁性状態となる。

【0336】このとき、フリー磁性層 17、非磁性層 18 及び強磁性層 19 からなる多層膜 F がひとつのフリー磁性層、いわゆるシンセティックフェリフリー磁性層として機能する。

【0337】このとき、第 2 の反強磁性層 20 の、凹部 32 の底面 32b の下部に位置する領域の厚さ t_2 を、0 Å より大きく 50 Å 以下にする。本実施の形態のように、第 2 の反強磁性層 20 の、凹部 32 の底面 32b の下部に位置する領域の厚さ t_2 を 0 Å より大きく 50 Å 以下にすると、凹部 32 の底面 32b の下部に位置する第 2 の反強磁性層 20 の領域では交換結合磁界が発生しない。そして、凹部 32 が形成されないトラック幅方向両側部 S、S では、第 2 の反強磁性層 20 と強磁性層 19 との間に交換結合磁界が発生する。

【0338】すなわち、強磁性層 19 の磁化方向は、凹部 32 の底面 32b に重なる領域以外のトラック幅方向両側部 S、S でのみ、第 2 の反強磁性層との間の交換結合磁界によって固定される。従って、強磁性層 19 の下層に非磁性層 18 を介して積層されているフリー磁性層 17 の磁化方向も、トラック幅方向両側部 S、S でのみ強磁性層 19 との RKKY 相互作用により固定される。

【0339】凹部 32 の底面 32b に重なるフリー磁性層 17 の領域 E は、外部磁界が印加されない状態において、磁化方向が固定された両側部 S、S にならって図示 X 方向に揃えられ、外部磁界が印加されるとその磁化方向が変化する。

【0340】また図 23 に示された工程の後、強磁性層 19 の途中まで掘り込むことにより、図 30 に示されるような凹部 32 を有する磁気検出素子を得ることもできる。凹部 32 は、側面 32a が第 2 反強磁性層 20 を貫通し、底面 32b が強磁性層 19 内に位置するものである。

【0341】図 30 に示された磁気検出素子でもフリー磁性層 17、非磁性層 18 及び強磁性層 19 からなる多層膜 F がひとつのフリー磁性層、いわゆるシンセティックフェリフリー磁性層 F として機能する。本発明では、フリー磁性層の外部磁化によって磁化方向が変化する感度領域 E の上層に第 2 反強磁性層 20 が全く存在しない。従って、シンセティックフェリフリー磁性層 F の感度領域 E の磁化方向の外部磁界依存性の変動を鋭敏にでき、磁気検出素子の磁界検出感度を向上できる。

【0342】また、図 21 に示された工程において、多層膜 A1 を形成するとき、非磁性層 18 とフリー磁性層 17 の間に、非磁性層 18 よりも比抵抗が低い材料、例えば Cu からなる導電性材料層 50 を形成し、最終的に図 31 に示される磁気検出素子を得られるようにしてもよい。

【0343】比抵抗が非磁性層 18 よりも低い導電性材

料からなる導電性材料層 50 が形成されていると、非磁性層 18 だけの場合よりも大きなスピフィルター効果を奏することができるようになり、磁気検出素子の磁界検出感度をさらに向上させることができるので好ましい。なお、導電性材料層 50 を Cu を用いて形成すると、NiFe や CoFeNi によって形成されたフリー磁性層 17 と結晶格子定数の値が近くなり、大きなスピフィルター効果を奏することができる。

【0344】導電性材料層 50 を形成するときには、例えば非磁性層 18 を Ru によって膜厚 t_3 が 0.4 ~ 1.1 nm であるものとして形成し、さらに、導電性材料層 50 を Cu によって膜厚 t_4 が 0.3 ~ 0.5 nm であるものとして形成することができる。

【0345】また、図 21 に示された工程において、多層膜 A1 を形成するとき、フリー磁性層 40 を、単位面積あたりの磁気モーメントの大きさが異なる第 1 フリー磁性層 40a (強磁性材料層) 及び第 2 フリー磁性層 40c (強磁性材料層) を非磁性中間層 40b を介して積層された、いわゆるシンセティックフェリフリー型のフリー磁性層として形成し、最終的に図 32 に示される磁気検出素子を得るようにしてもよい。なお、第 1 フリー磁性層 40a (強磁性材料層) 及び第 2 フリー磁性層 40c (強磁性材料層) と非磁性中間層 40b の材料及び膜厚は図 17 に示された磁気検出素子のフリー磁性層 40 と同じにすることが好ましい。

【0346】図 32 に示される磁気検出素子は、フリー磁性層 40 が、単位面積あたりの磁気モーメントの大きさが異なる複数の強磁性材料層が、非磁性層を介して積層され、非磁性層を介して隣接する強磁性材料層の磁化方向が反平行となる人工フェリ磁性状態であるものである。

【0347】図 29 ないし図 32 に示す磁気検出素子も、第 1 の反強磁性層 14 の下に下部シールド層を兼用した下部電極層 70 が設けられ、また第 2 の反強磁性層 20 上には絶縁層 71 が設けられ、凹部 31、32、33 の側面 31a、32a、33a に他の絶縁層 72 が設けられ、さらに絶縁層 71 上、及び他の絶縁層 72 上から凹部 31、32、33 の底面 31b、32b、33b 上にかけて上部シールド層を兼用した上部電極層 73 が設けられている。

【0348】本実施の形態のように、非磁性層 18 を Ru、Rh、Ir、Re、Os のうち 1 種あるいは 2 種以上の合金で形成すると、第 1 の磁場中アニールにおいて、非磁性層 18 の表面がほとんど酸化しない。従って、非磁性層 18 上に強磁性層 19 をスパッタ成膜する前に、非磁性層 18 の表面をミリングなどで処理しなくても、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 との間に非磁性層 18 を介した RKKY 相互作用を働かせることができる。例えばフリー磁性層 17 と強磁性層 19 をともに NiFe で形成し、非磁性層 18 を Ru で形成した場合、

非磁性層 18 の表面をミリングなどで処理しなくても 42 (kA/m) の一方向異方性磁界を発生させることができる。

【0349】すなわち、非磁性層 18 と強磁性層 19、19 との界面を、ミリングによって削られた面としなくてもすむようにできるので、フリー磁性層 17 と強磁性層 19 の間の反平行結合磁界及びフリー磁性層 17 の磁化方向を一定方向に揃えるための一方向異方性磁界の低下を防ぐことができる。

【0350】ただし、強磁性層 19 とフリー磁性層 17 は、非磁性層 18 を介した RKKY 相互作用によって磁氣的に結合されたものであるため、非磁性層 18 の表面をミリングによって処理した場合でも、第 2 反強磁性層 20 と強磁性層 19 間の交換結合磁界を非磁性層 18 を介してフリー磁性層 17 に十分媒介することができ、フリー磁性層の磁化方向を一定方向に揃えるために十分な一方向異方性磁界を得ることができる。

【0351】さらに、非磁性層 18 を Ru で形成し、フリー磁性層 17 を CoFe で形成するとフリー磁性層 17 の磁歪を 0 にすることも可能である。

【0352】なお、本実施の形態の磁気検出素子は、第 1 反強磁性層 14 と第 2 反強磁性層 20 を同じ組成の反強磁性材料を用いて形成することができる。

【0353】図 33 及び図 34 に示す磁気検出素子は、図 28 の磁気検出素子と同じく CPP 型の磁気検出素子であるが、下部シールド層を兼ねる下部電極層 80 の形状が図 28 のそれとは異なっている。

【0354】図 33 に示す磁気検出素子は、図 28 と同じ多層膜 A の膜構成を有し、しかも第 2 反強磁性層 20 上には絶縁層 71 が形成され、凹部 31 の側面 31a には他の絶縁層 72 が形成され、さらに絶縁層 71 上から凹部 31 の底面 31b 上にかけて上部シールド層を兼用した上部電極層 73 が設けられており、この点で図 28 と一致している。

【0355】図 28 と異なるのは、NiFe などの磁性材料からなる下部シールド層を兼用した下部電極層 80 のトラック幅方向 (図示 X 方向) の中央部に、多層膜 A 方向 (図示 Z 方向) に突出した突出部 80a が設けられ、この突出部 80a の上面 80a1 が多層膜 A の下面に接しており、突出部 80a から多層膜 A 内に (あるいは多層膜 A から突出部 80a に) 電流が流れるようになっている点である。

【0356】そして図 33 に示す磁気検出素子では下部電極層 80 のトラック幅方向 (図示 X 方向) における両側端部 80b と多層膜 A 間に絶縁層 81 が設けられている。絶縁層 81 は、Al₂O₃、SiO₂、AlN、TiO₂、Ti₂O₃、Al-Si-O などの絶縁材料で形成される。

【0357】図 33 に示す磁気検出素子では、下部電極層 80 は、突出部 80a の形成によって多層膜 A に対す

る電流経路が絞り込まれ、さらに下部電極層 80 の両側端部 80 b と多層膜 A 間に絶縁層 81 が設けられたことで、両側端部 80 b から多層膜 A 内に電流が分流することを適切に抑制でき、より効果的に再生出力の大きい磁気検出素子を製造することが可能になる。

【0358】なお、図 33 に示す磁気検出素子では、下部電極層 80 の突出部 80 a の上面 80 a 1 のトラック幅方向（図示 X 方向）の幅寸法は領域 E のトラック幅方向（図示 X 方向）における幅寸法と一致しているが、上面 80 a 1 の幅寸法が領域 E の幅寸法より広くてもよい。より好ましくは上面 80 a 1 の幅寸法がトラック幅 Tw と一致することである。これによってより効果的に多層膜 A に対しトラック幅 Tw の領域内にのみ電流を流すことができ再生出力の大きい磁気検出素子を製造することが可能である。

【0359】また図 33 に示す実施形態では、下部電極層 80 に形成された突出部 80 a のトラック幅方向（図示 X 方向）における両側面 80 a 2 は、突出部 80 a のトラック幅方向における幅寸法が、多層膜 A から離れる（図示 Z 方向と逆方向）にしたがって徐々に広がる傾斜面あるいは湾曲面で形成されているが、両側面 80 a 2 は、トラック幅方向（図示 X 方向）に対して垂直面であってかまわない。

【0360】図 34 に示す実施形態は、図 33 に示す実施形態と同じ形状の下部電極層 80 を有している。すなわち図 34 に示す下部電極層 80 のトラック幅方向（図示 X 方向）の中央部には、多層膜 A 方向（図示 Z 方向）に突出した突出部 80 a が設けられ、この突出部 80 a の上面 80 a 1 が多層膜 A の下面に接しており、突出部 80 a から多層膜 A 内に（あるいは多層膜 A から突出部 80 a に）電流が流れるようになっている。そして下部電極層 80 のトラック幅方向（図示 X 方向）における両側端部 80 b と多層膜 A 間に絶縁層が設けられている。

【0361】図 34 に示す実施形態では図 33 と異なっており、第 2 反強磁性層 20 上に絶縁層 71 が設けられておらず、また凹部 31 の側面 31 a に他の絶縁層 72 が設けられていない。そして NiFe などの磁性材料からなり、上部シールド層を兼用する上部電極層 73 は第 2 反強磁性層 20 上から凹部 31 の側面 31 a 上及び底面 31 b 上にかけて直接接合されている。

【0362】図 34 に示す実施形態では、図 33 に示す実施形態に比べて上部電極層 73 と第 2 反強磁性層 20 間、及び上部電極層 73 と凹部 31 の側面 31 a 間が絶縁されていないので、電流経路はトラック幅 Tw よりも広がりやすく再生出力は劣るものと考えられるが、多層膜 A の下面側で、下部電極層 80 に形成された突出部 80 a によって電流経路を絞り込むことができ、電流経路の広がりを抑えて再生出力の低下を抑制することができる。

【0363】また図 33 及び図 34 に示す磁気検出素子

では、下部電極層 80 に形成された突出部 80 a の上面 80 a 1 と、その両側に形成された絶縁層 81 の上面 81 a とが同一平面で形成されていることが好ましい。これによって突出部 80 a 上から絶縁層 81 上にかけて形成される多層膜 A の各層の膜面をトラック幅方向に、より平行に形成でき、再生特性に優れた磁気検出素子を製造することが可能になる。

【0364】図 33 及び図 34 に示す磁気検出素子の下部電極層 80 及び絶縁層 81 の製造方法を説明する。

【0365】まず、図 35 に示すように、NiFe などの磁性材料を用いて、下部電極層 80 をメッキまたはスパッタ形成し、表面をポリシング等で平滑化処理した後、下部電極層 80 のトラック幅方向（図示 X 方向）の中央部上にレジスト層 92 を形成する。

【0366】次に、図 36 に示すように、このレジスト層 92 に覆われていない下部電極層 80 の両側端部 80 b をイオンミリングで途中まで削り込む。これによって下部電極層 80 のトラック幅方向の中央部に突出部 80 a を形成することができる。

【0367】さらに、図 37 に示すように、レジスト層 92 に覆われていない下部電極層 80 の両側端面 80 b 上に絶縁層 81 をスパッタ成膜し、絶縁層 81 の上面 81 a が下部電極層 80 の突出部 80 a の上面 80 a 1 とほぼ同一平面となった時点で前記スパッタ成膜を終了する。そしてレジスト層 92 を除去する。

【0368】なおレジスト層 92 を除去した後、下部電極層 80 の突出部 80 a の上面 80 a 1 及び絶縁層 81 の上面 81 a を CMP などを用いて研磨し、突出部 80 a の上面 80 a 1 と絶縁層 81 の上面 81 a を高精度に同一平面となるようにしてもよい。この場合最初のポリシング等の平滑化処理を省略することができる。

【0369】レジスト層 92 を除去した後、下部電極層 80 及び絶縁層 81 上に、多層膜 A を積層する。

【0370】図 28 ないし図 34 に示す CPP 型の磁気検出素子では下部シールド層を兼ねる下部電極層 70 または 80 及び上部シールド層を兼ねる上部電極層 73 を多層膜の上下に接して形成しているが、このような構成によって電極層とシールド層とを別々に形成する必要性が無くなり、CPP 型の磁気検出素子の製造を容易化することが可能になる。

【0371】しかも電極機能とシールド機能とを兼用させれば、シールド層間の間隔で決定されるギャップ長 G1 を非常に短くすることができ、今後の高記録密度化により適切に対応可能な磁気検出素子を製造することが可能になる。

【0372】ただし、必要ならば、絶縁層 71、72 から凹部 31、32、33 の底面 31 b、32 b、33 b にかけて点線で示された非磁性層 74 を積層した後、非磁性層 74 上に上部電極層 73 を形成してもよい。非磁性層 74 は、Ta、Ru、Rh、Ir、Cr、Re、C

uなどの非磁性導電材料で形成されることが好ましい。

【0373】非磁性層74は上部ギャップ層としての役割を有するものであるが、非磁性層74は電流経路の出入口となる凹部31、32、33の底面31b、32b、33bにも形成されるため、例えば絶縁材料からなる非磁性層74で覆うことは前記電流が多層膜内に流れにくくなるため好ましくない。よって本発明では非磁性層74を非磁性導電材料で形成することが好ましい。

【0374】また、本発明では、多層膜の上面及び／または下面に、例えばAu、W、Cr、Taなどからなる電極層を設け、多層膜と反対側の電極層の面にギャップ層を介して磁性材料製のシールド層を設ける構成であってもかまわない。

【0375】図28ないし図34に示すCIP型の磁気検出素子においても、図6、図7、図8、図12、図15、図16、図17のCIP型の磁気検出素子と同じ効果を期待することができる。

【0376】すなわち本発明では、凹部31、32、33は一樣の厚さで成膜された第2反強磁性層を、反応性イオンエッチング(RIE)やイオンミリングを用いて、トラック幅方向(図示X方向)に対し垂直方向に削るだけで形成することができるので、正確な幅寸法で凹部31、32、33を形成することが可能になる。すなわち、磁気検出素子のトラック幅Twを正確に規定できる。

【0377】また、磁気検出素子の形成時に設定されたトラック幅(光学的トラック幅)Twの領域に不感領域が生じないので、高記録密度化に対応するために磁気検出素子の光学的トラック幅Twを小さくしていった場合の再生出力の低下を抑えることができる。

【0378】さらに、本実施の形態では磁気検出素子の側端面がトラック幅方向に対して垂直となるように形成されることが可能なので、フリー磁性層17のトラック幅方向長さのバラつきを抑えることができる。以上によってサイドリーディングの発生を適切に抑制することが可能になる。

【0379】なお、図28ないし図34に示す磁気検出素子では非磁性材料層16がCuなどの非磁性導電材料で形成されてもよいし、あるいは非磁性材料層16がAl₂O₃やSiO₂などの絶縁材料で形成されてもよい。前者の磁気検出素子はスピバルブGMR型磁気抵抗効果素子と呼ばれる構造(CPP-GMR)であり、後者の磁気検出素子はスピバルブトンネル型磁気抵抗効果素子(CPP-TMR)と呼ばれる構造である。

【0380】トンネル型磁気抵抗効果素子は、トンネル効果を利用して抵抗変化を生じさせるものであり、固定磁性層15とフリー磁性層17との磁化が反平行のとき、最も非磁性材料層16を介したトンネル電流が流れにくくなって、抵抗値は最大になり、一方、固定磁性層15とフリー磁性層17との磁化が平行のとき、最もト

ンネル電流は流れ易くなり抵抗値は最小になる。

【0381】この原理を利用し、外部磁界の影響を受けてフリー磁性層17の磁化が変動することにより、変化する電気抵抗を電圧変化(定電流動作の場合)または電流変化(定電圧動作の場合)としてとらえ、記録媒体からの洩れ磁界が検出されるようになっている。

【0382】なお、CPP-GMR型の磁気検出素子は、光学トラック幅Twを0.1μm以下、特に0.06μm以下にして、200Gbit/in²以上の記録密度に対応する際に特に有効である。

【0383】以上詳述した実施の形態のCIP型磁気検出素子及びCPP型磁気検出素子の上に書き込み用のインダクティブ素子が積層されてもよい。

【0384】また本発明の磁気検出素子は、磁気センサやハードディスクなどに用いられる。

【0385】

【発明の効果】以上、詳細に説明した本発明は、前記(c)の工程において前記強磁性層及び前記第2反強磁性層を平坦面として形成された前記非磁性層の表面上に積層するものであるので、前記強磁性層及び前記第2反強磁性層も平坦化された層として形成でき、前記強磁性層、前記非磁性層、及び前記フリー磁性層からなるセンセティックフェリ構造において前記強磁性層と前記フリー磁性層間のRKKY相互作用を大きくすることが容易になる。

【0386】また、前記強磁性層及び前記第2の反強磁性層が、平坦面である前記非磁性層上に積層されたものであると、前記強磁性層及び前記第2の反強磁性層の積層工程の制御が容易になる。特に、前記強磁性層、前記非磁性層、及び前記フリー磁性層からなるセンセティックフェリ構造において前記強磁性層を薄く形成することができ、前記強磁性層と前記フリー磁性層間のスピントロップ磁界を大きくすることが容易になる。

【0387】また、本発明では、前記フリー磁性層である磁性材料層を前記第2反強磁性層及び前記強磁性層の下層にまで延して形成するので、前記フリー磁性層の磁化が前記フリー磁性層の両側端部の表面磁荷によって発生する反磁界の影響を受けることを小さくできる。

【0388】また、本発明では、前記多層膜上に第2反強磁性層を積層しない状態で、前記多層膜を、磁場中アニールして前記固定磁性層の磁化方向を所定方向に固定するので、前記多層膜上に第2反強磁性層を積層した状態では、前記第2反強磁性層に交換異方性磁界が発生していない。

【0389】すなわち、前記第2反強磁性層の交換異方性磁界は、前記(e)の工程において初めて生じ、前記フリー磁性層の磁化方向を所定方向に移動させることが容易になる。従って、前記フリー磁性層の磁化方向を、前記固定磁性層の磁化方向と直交する方向に固定することが容易になる。

【0390】また、本発明の製造方法によって製造された磁気検出素子では、トラック幅が前記凹部の底面の幅寸法によって決定される。すなわち、前記凹部の底面に重なる部分でのみ、前記フリー磁性層などの外部磁界によって磁化方向が変化する磁性層の磁化方向を変化させることができる。しかも、前記凹部は、一様の厚さで成膜された前記第2反強磁性層を、反応性イオンエッチング(RIE)やイオンミリングを用いて、トラック幅方向に対する垂直方向に削るだけで形成することができるので、正確な幅寸法で前記凹部を形成することが可能になる。すなわち、磁気検出素子のトラック幅を正確に規定できる。

【0391】なお、本発明において前記非磁性層を、例えばRu、Rh、Ir、Re、Osのうち1種あるいは2種以上の合金で形成すると、前記非磁性層の表面がほとんど酸化しない。従って、前記非磁性層上に前記強磁性層をスパッタ成膜する前に、前記非磁性層の表面をミリングなどで処理しなくても、前記フリー磁性層と前記強磁性層との間に前記非磁性層を介したRKKY相互作用を働かせることができる。

【0392】すなわち、本発明の磁気検出素子の製造方法によれば、前記非磁性層と前記強磁性層との界面を、ミリングによって削られた面としなくてもすむようにできるので、前記フリー磁性層の両側部における磁化方向を一定方向に揃えるための一方向異方性磁界の低下を防ぐことができる。

【0393】また本発明における磁気検出素子はCIP型の磁気検出素子でもCPP型の磁気検出素子でもどちらにも適用可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態である磁気検出素子の製造方法の一工程を示す断面図、

【図2】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図1の次工程を示す断面図、

【図3】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図2の次工程を示す断面図、

【図4】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図3の次工程を示す断面図、

【図5】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図4の次工程を示す断面図、

【図6】本発明の第1の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図7】本発明の第2の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図8】本発明の第3の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図9】本発明の第4の実施の形態である磁気検出素子の製造方法の一工程を示す断面図、

【図10】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図9の次工程を示す断面図、

【図11】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図10の次工程を示す断面図、

【図12】本発明の第4の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図13】本発明の第5の実施の形態である磁気検出素子の製造方法の一工程を示す断面図、

【図14】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図13の次工程を示す断面図、

【図15】本発明の第5の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図16】本発明の第6の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図17】本発明の第7の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図18】シンセティックフェリフリー型の磁性層のヒステリシスループの概念図、

【図19】バックド層によるスピフィルター効果を説明するための模式説明図、

【図20】バックド層によるスピフィルター効果を説明するための模式説明図、

【図21】本発明の第8の実施の形態である磁気検出素子の製造方法の一工程を示す断面図、

【図22】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図21の次工程を示す断面図、

【図23】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図22の次工程を示す断面図、

【図24】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図23の次工程を示す断面図、

【図25】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図24の次工程を示す断面図、

【図26】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図25の次工程を示す断面図、

【図27】本発明の磁気検出素子の製造方法における、図26の次工程を示す断面図、

【図28】本発明の第8の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図29】本発明の第9の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図30】本発明の第10の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図31】本発明の第11の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図32】本発明の第12の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図33】本発明の第13の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図34】本発明の第14の実施の形態によって形成された磁気検出素子をABS面側から見た断面図、

【図35】本発明の第13及び第14の実施の形態の磁気検出素子の製造方法の一工程を示す断面図、

【図 3 6】 本発明の磁気検出素子の製造方法における、図 3 5 の次工程を示す断面図、

【図 3 7】 本発明の磁気検出素子の製造方法における、図 3 6 の次工程を示す断面図、

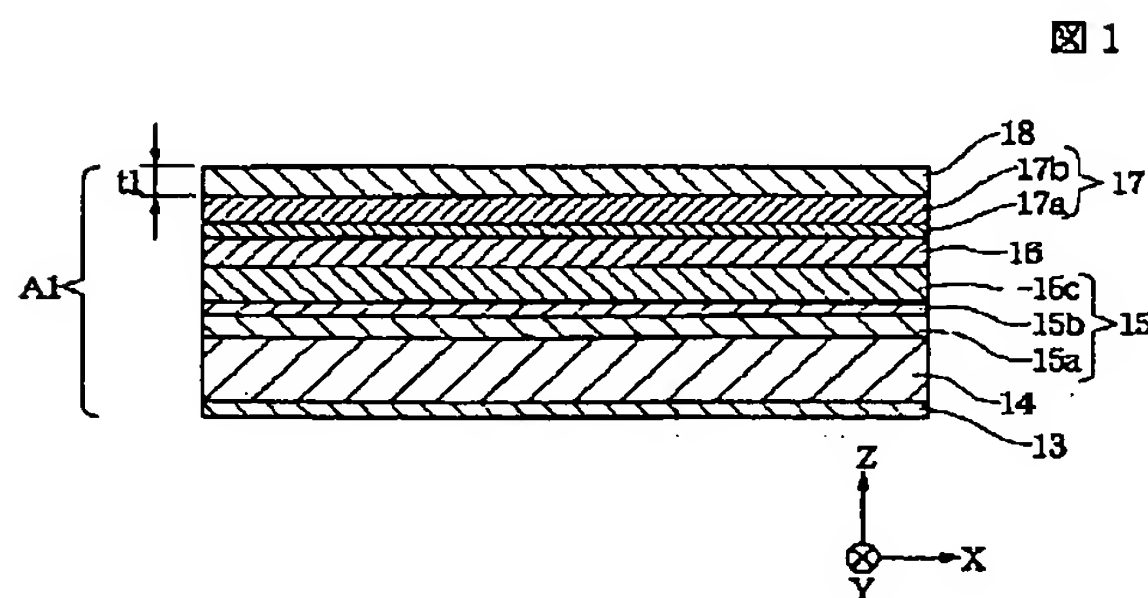
【図 3 8】 従来の磁気検出素子の断面図、

【符号の説明】

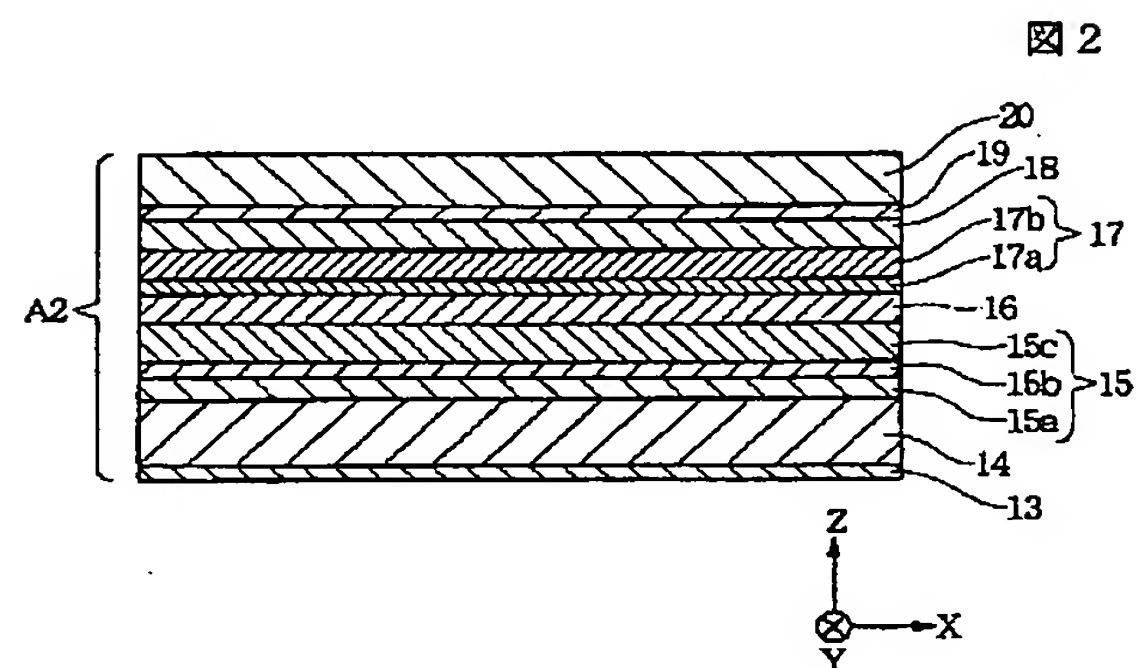
- 1 1 下部シールド層
- 1 2 下部ギャップ層
- 1 3 下地層
- 1 4 第 1 反強磁性層
- 1 5 固定磁性層
- 1 5 a 第 1 固定磁性層
- 1 5 b 非磁性中間層
- 1 5 c 第 2 固定磁性層
- 1 6 非磁性材料層
- 1 7 フリー磁性層

- * 1 7 a 拡散防止層（中間層）
- 1 7 b 強磁性層
- 1 8 非磁性層
- 1 9 強磁性層
- 2 0 第 2 反強磁性層
- 2 1、2 6、2 7 電極層
- 2 2、3 0、3 1 凹部
- 2 3 上部ギャップ層
- 2 4 上部シールド層
- 10 7 0 下部電極層
- 7 1 絶縁層
- 7 2 他の絶縁層
- 7 3 上部電極層
- C トラック幅領域（中央部）
- E 感度領域
- * S 両側部

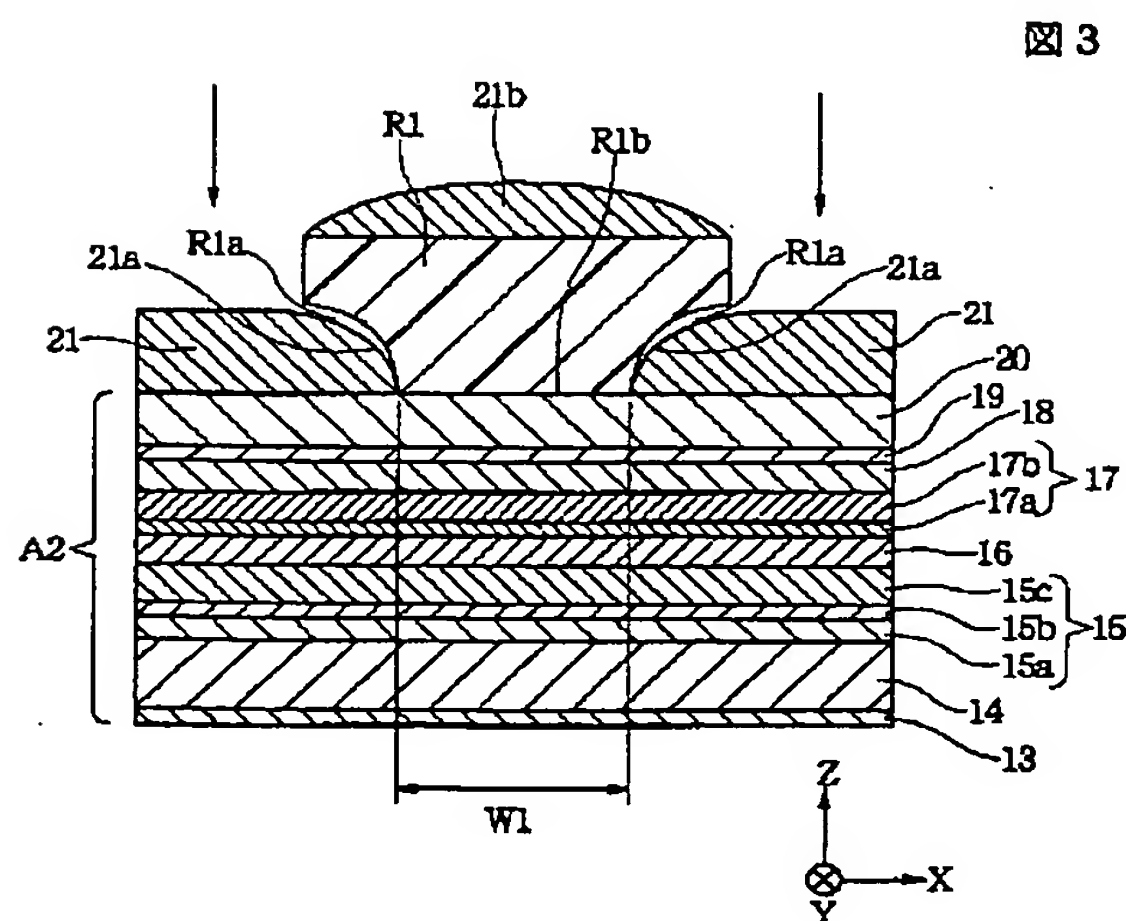
【図 1】



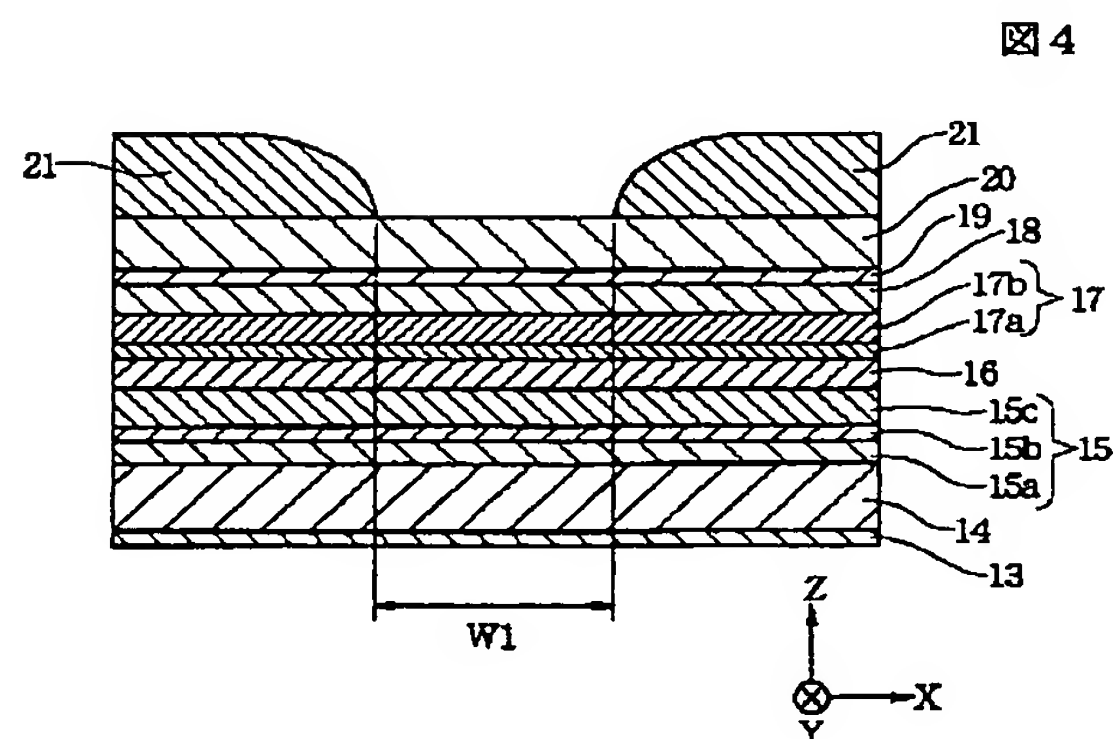
【図 2】



【図 3】



【図 4】



【図 5】

【図 9】

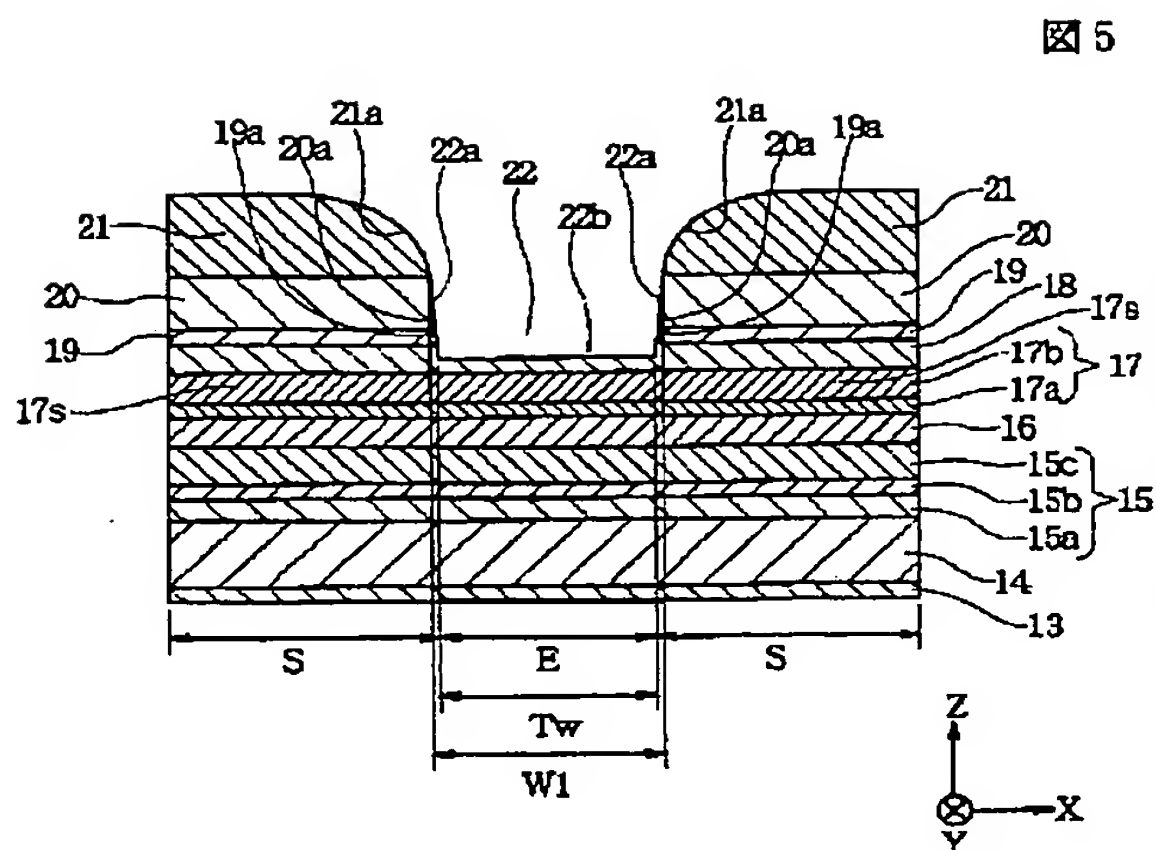
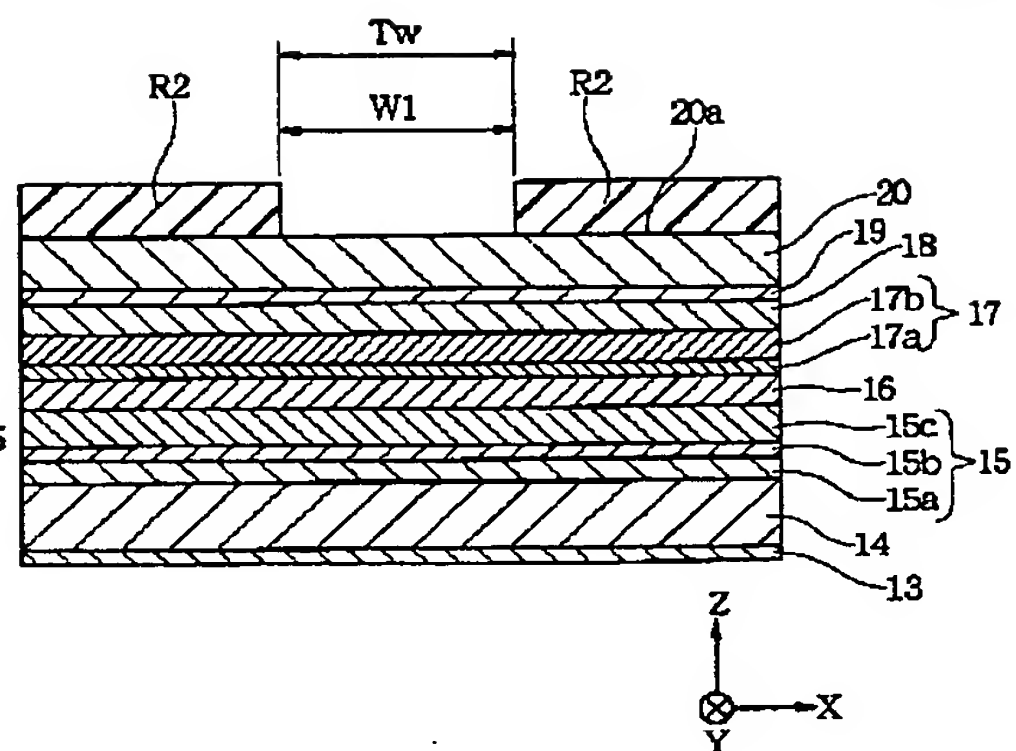


図 5

図 9



【図 6】

【図 13】

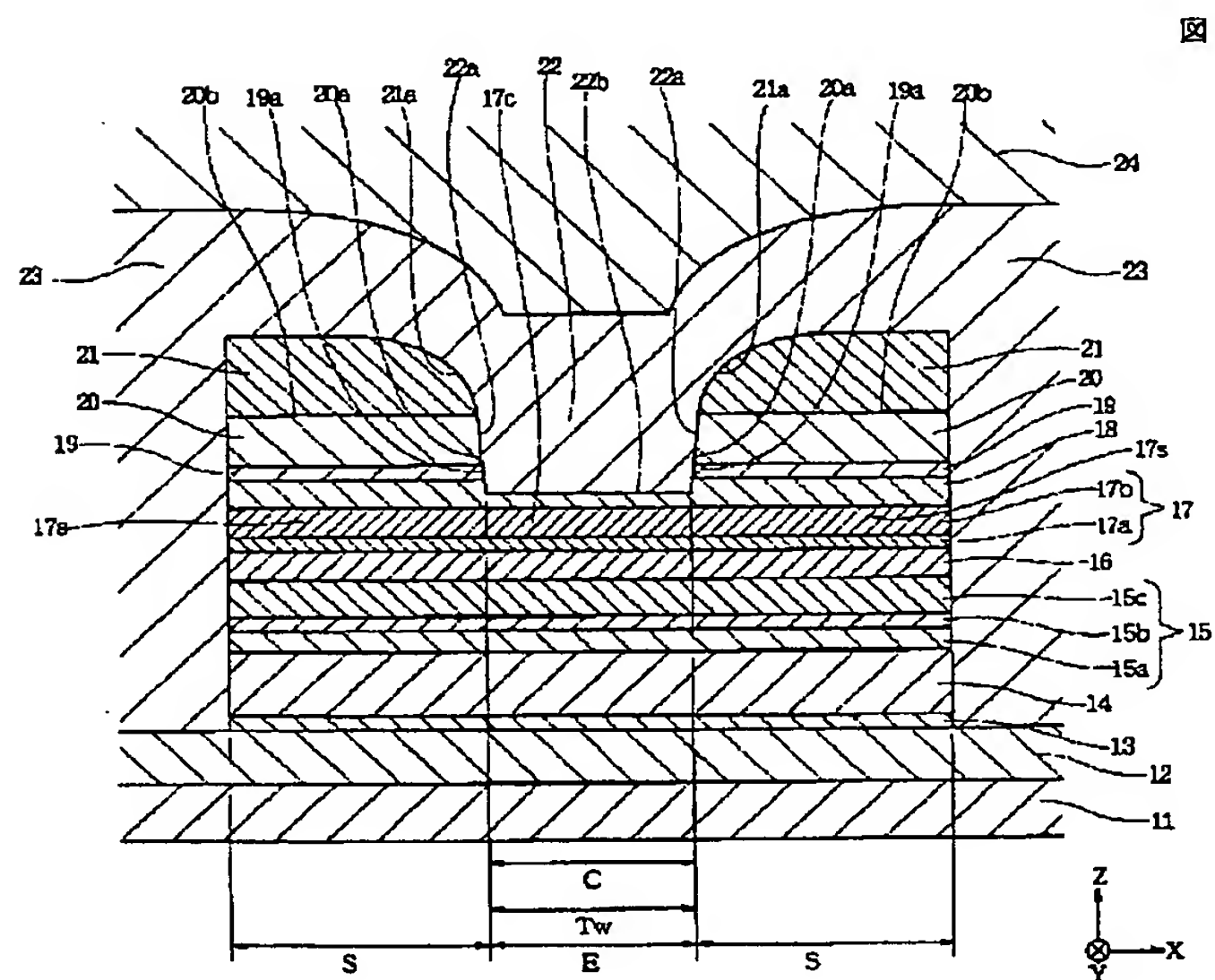
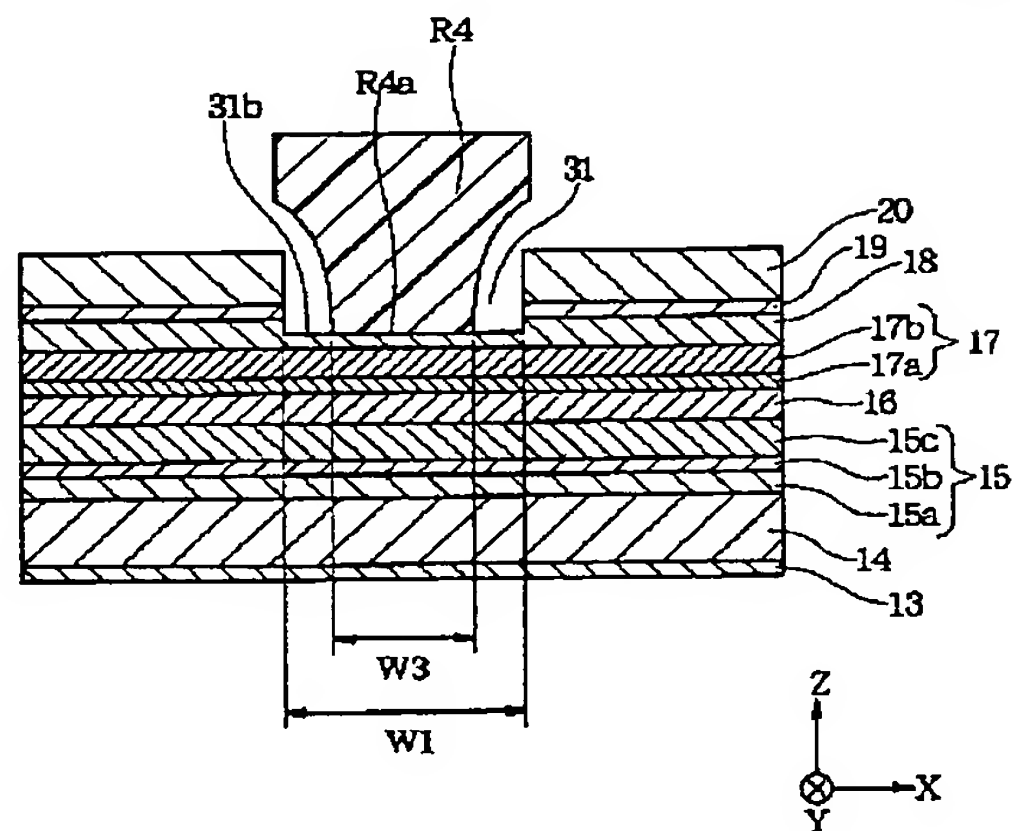


図 6

図 13

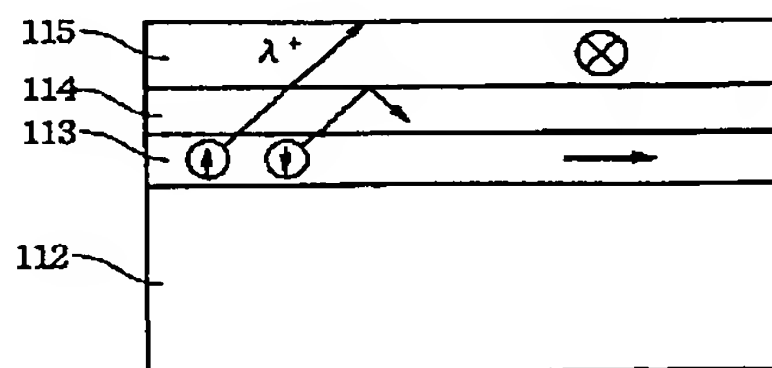
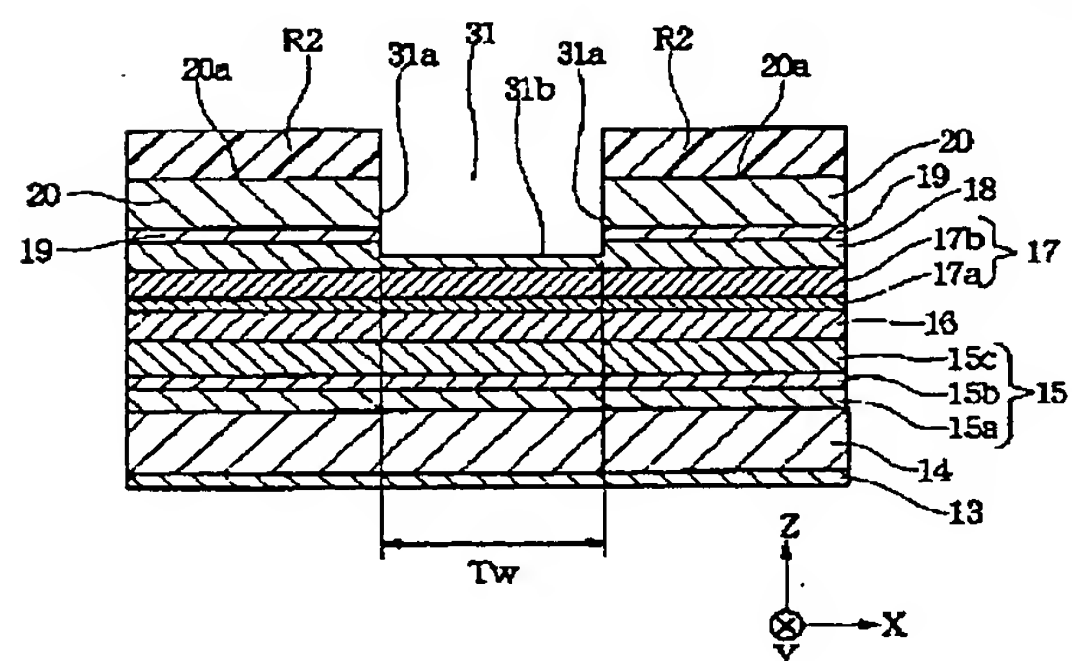


【図 10】

【図 19】

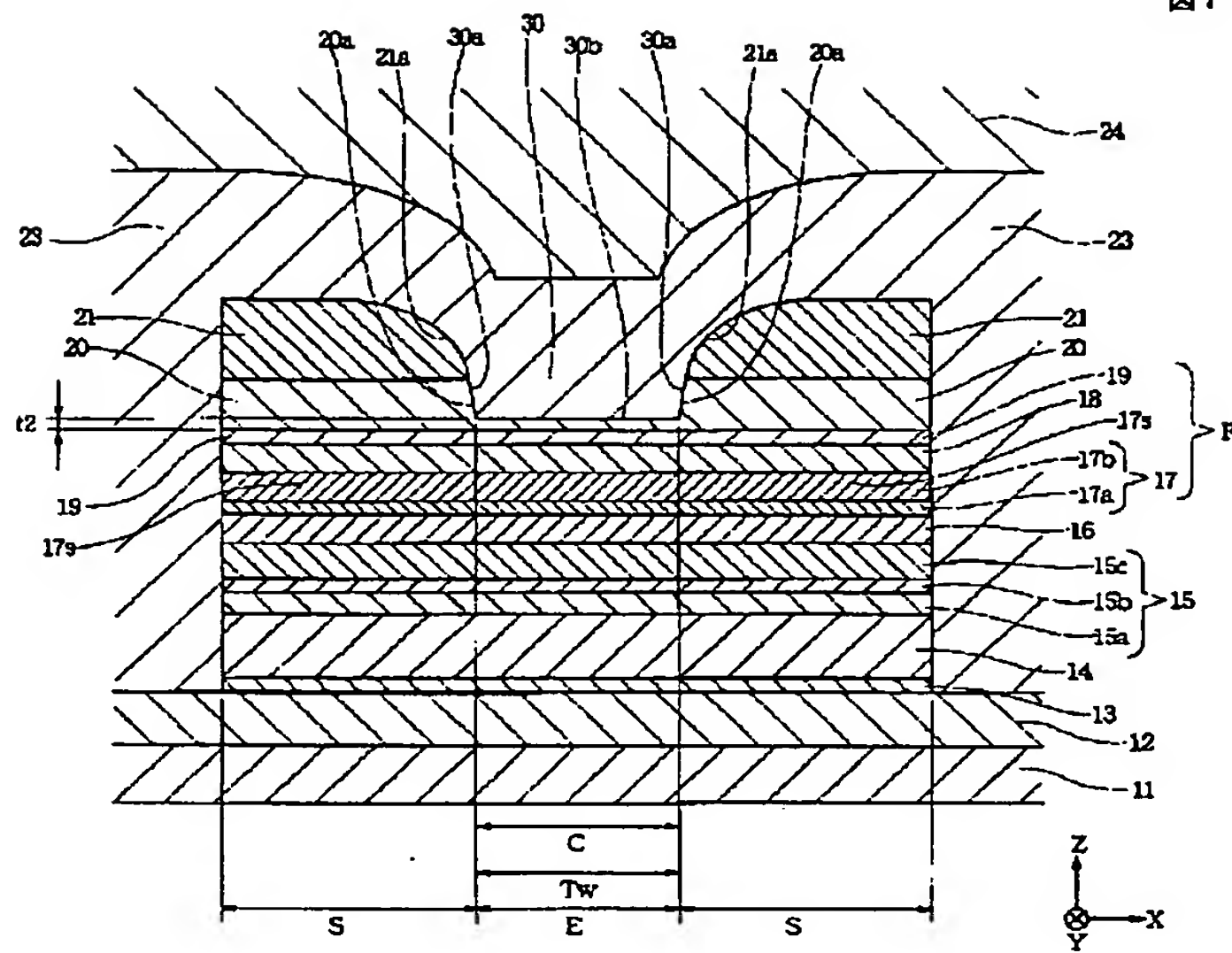
図 10

図 19



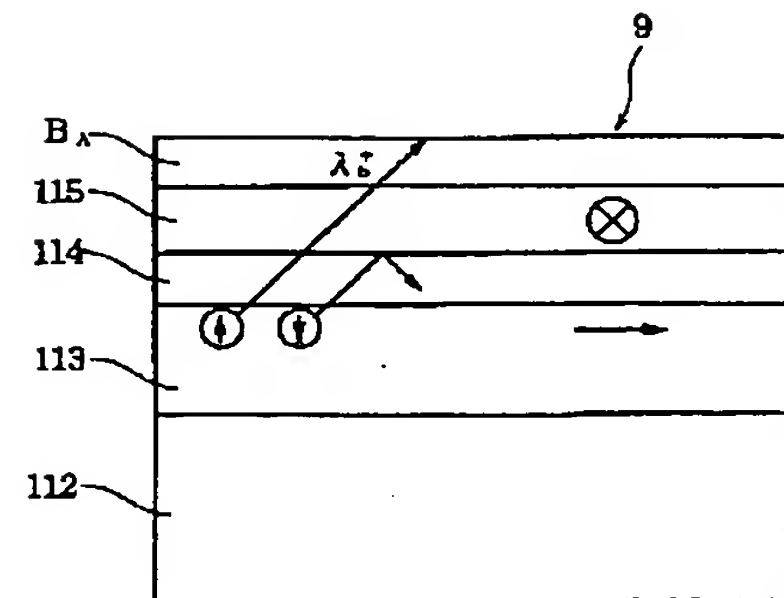
【図 7】

図 7



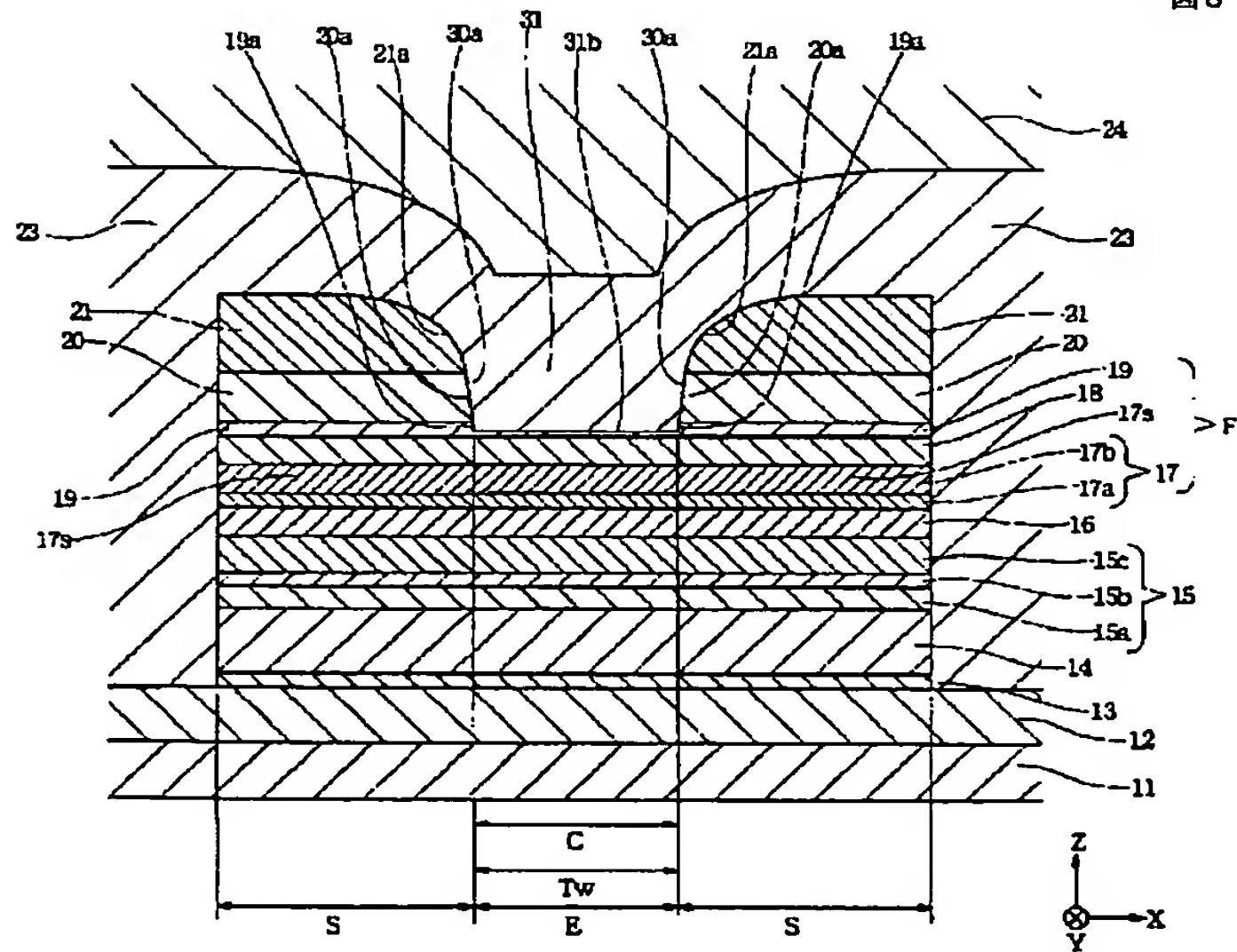
【図 20】

図 20



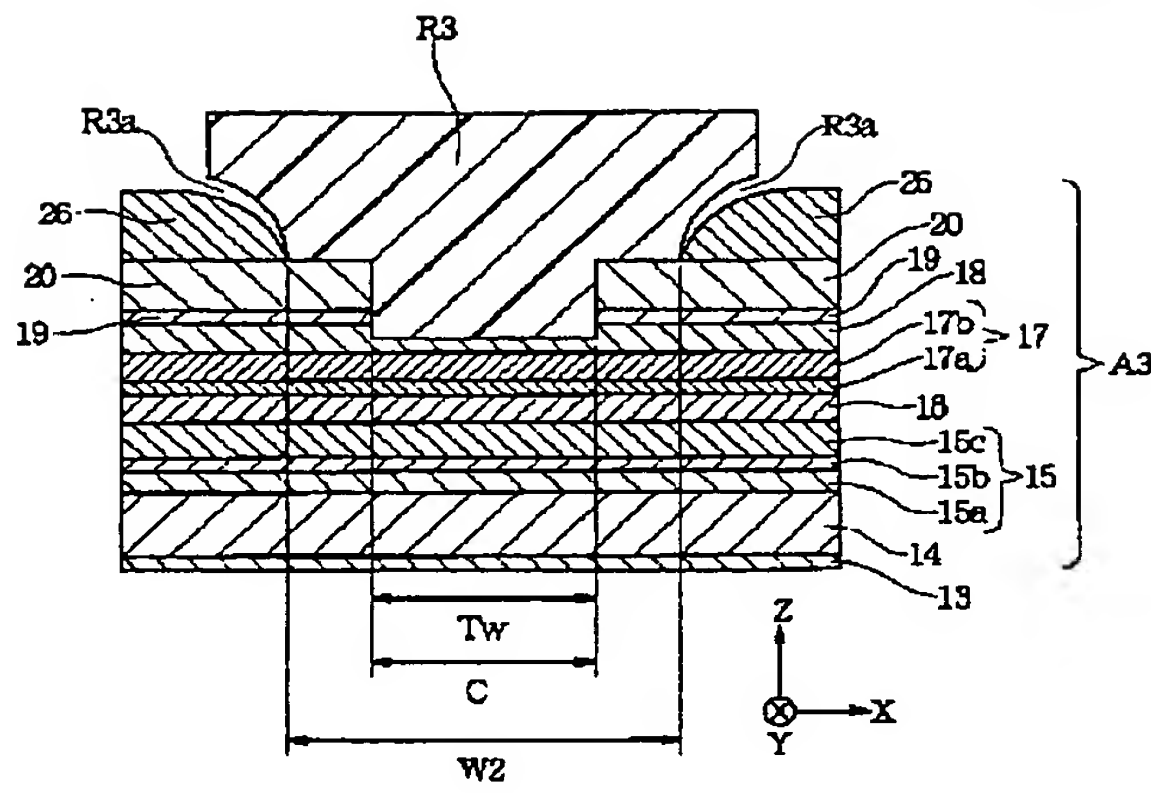
【図 8】

図 8



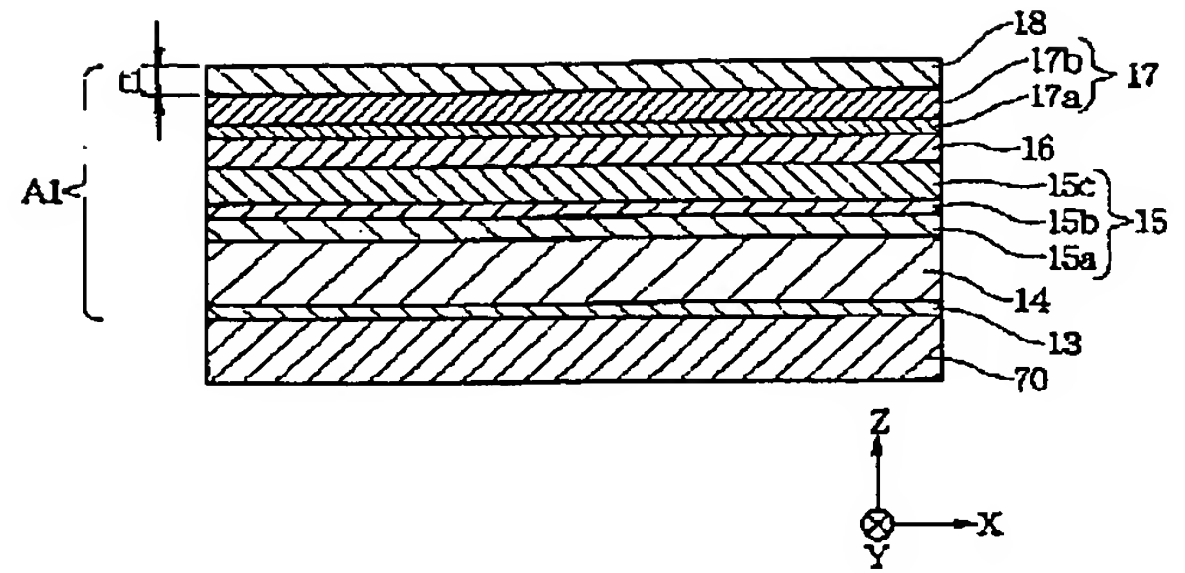
【図 11】

図 11



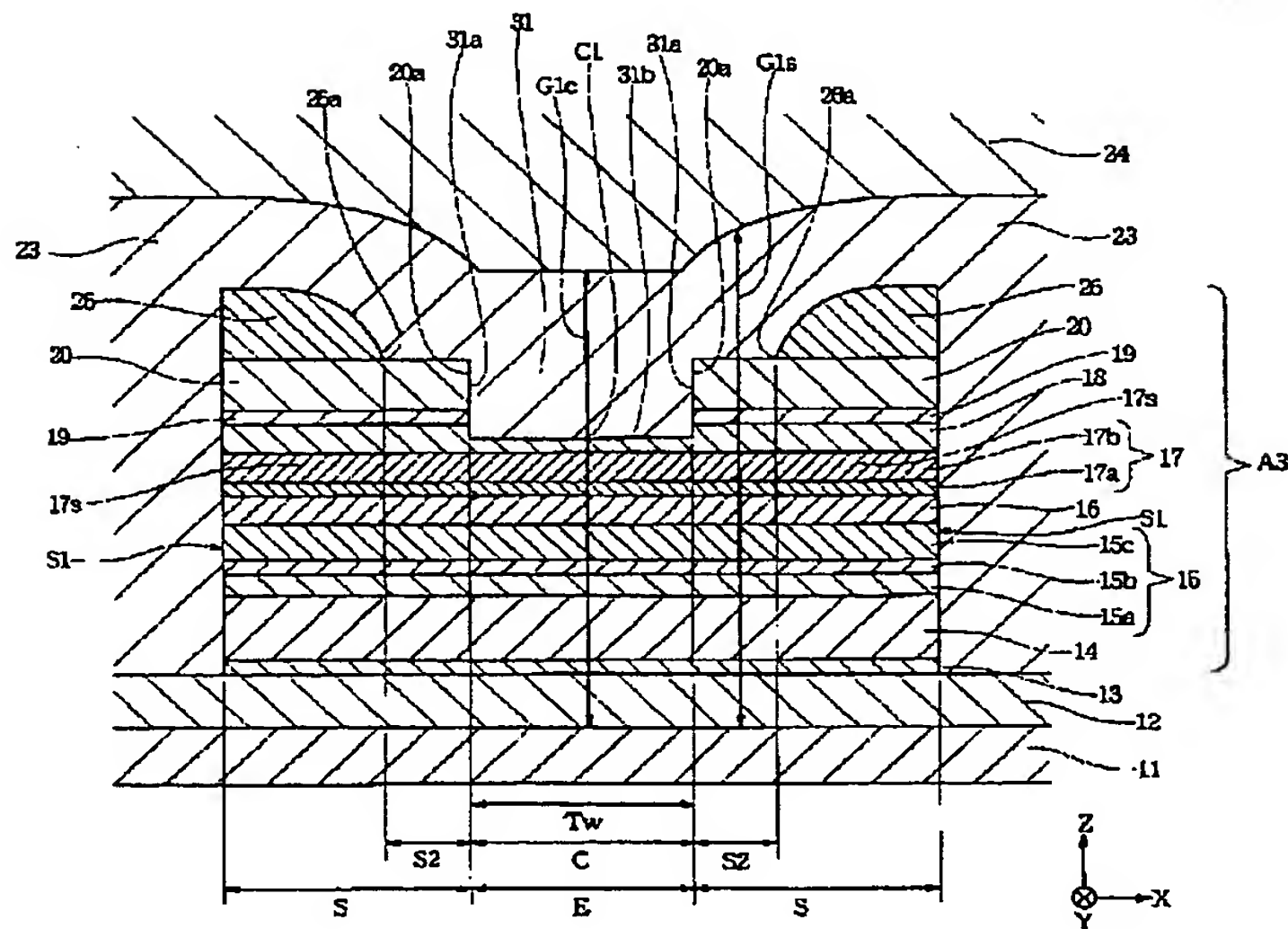
【図 21】

図 21



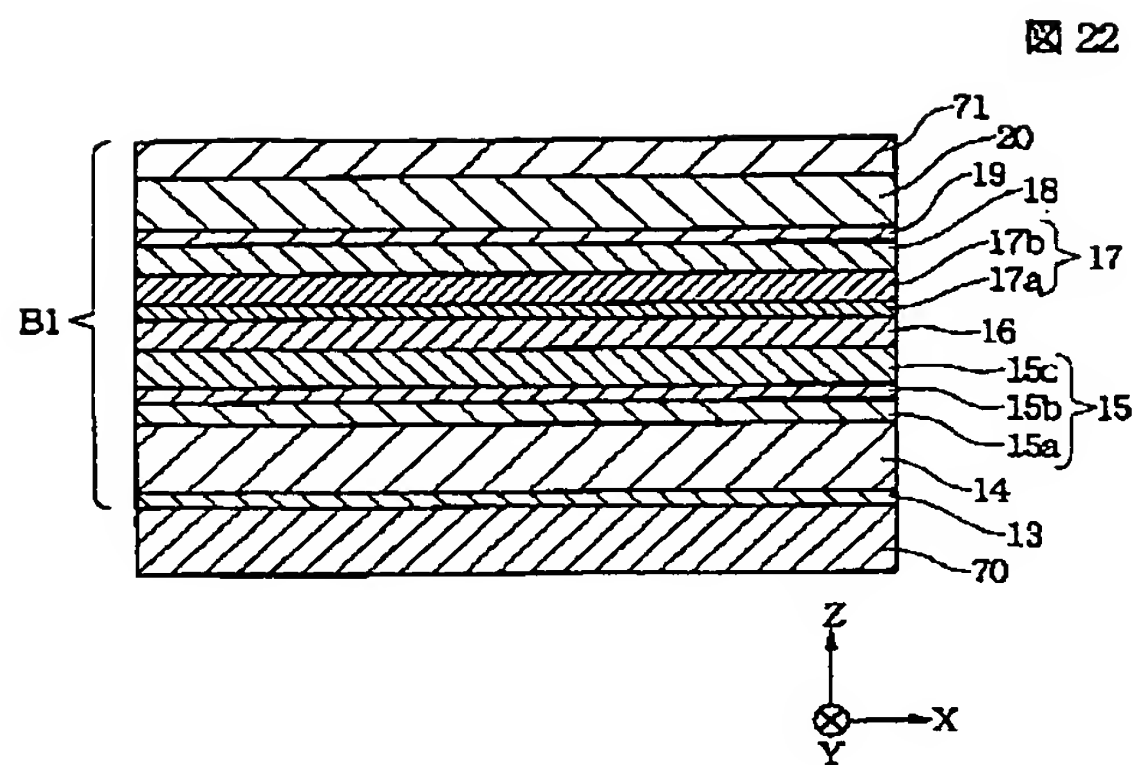
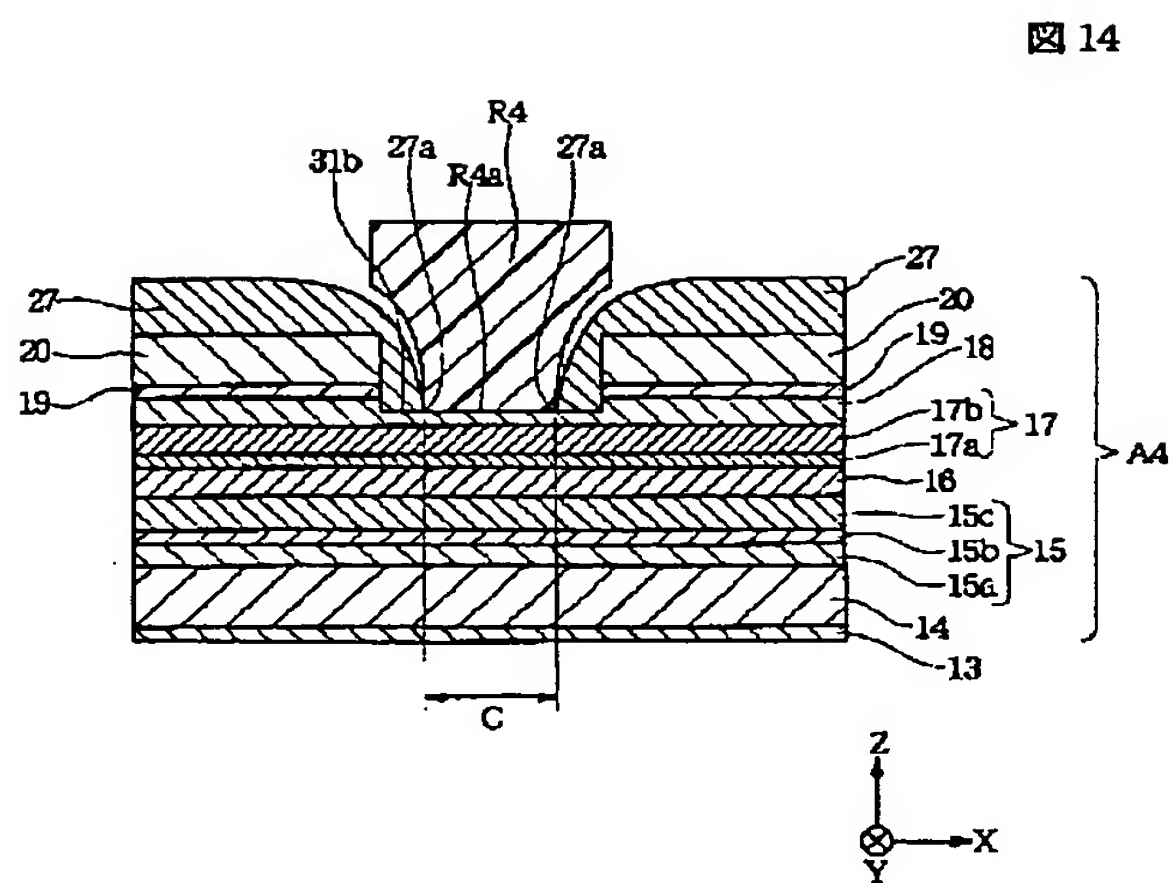
【図 12】

図 12

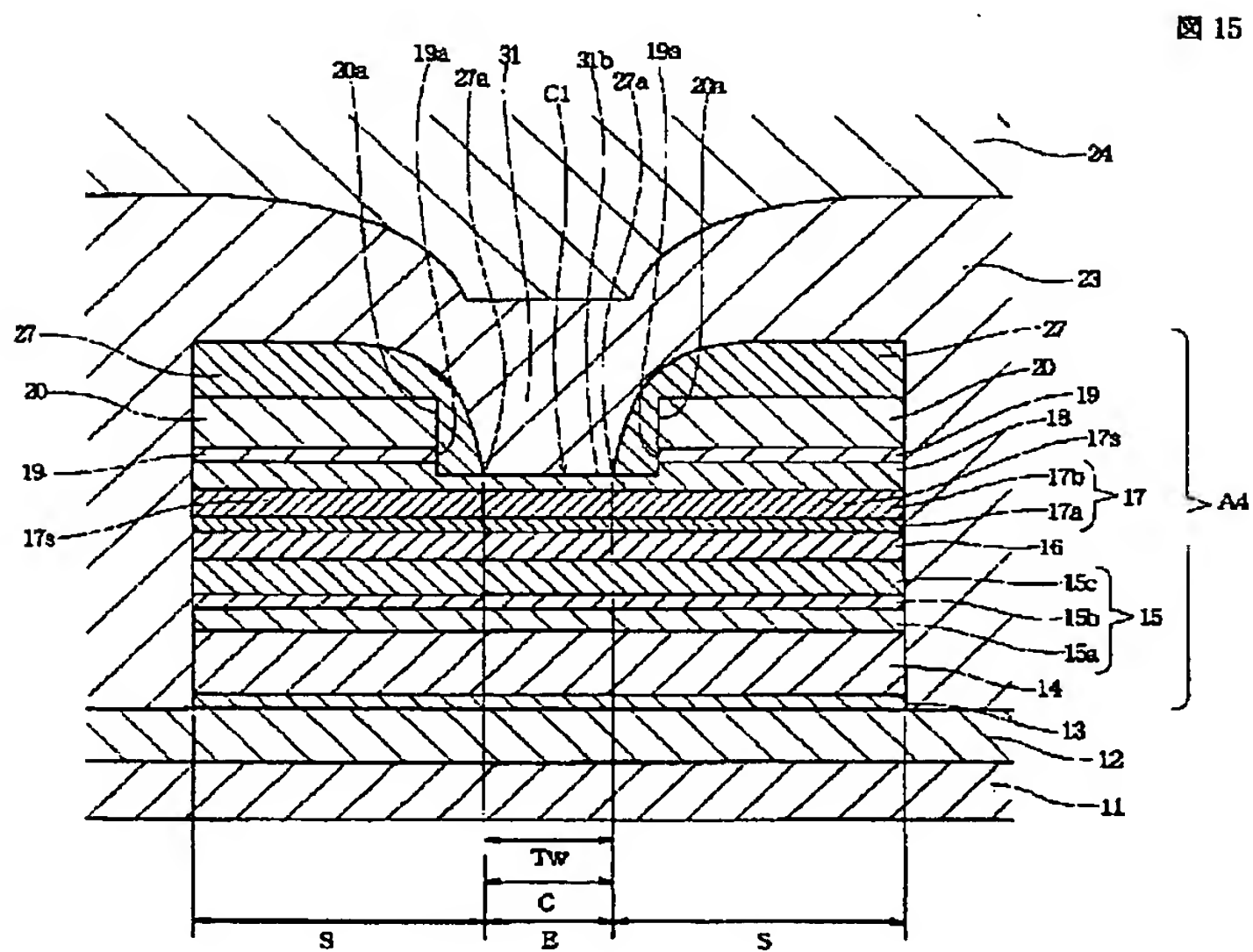


【图 14】

【図 22】

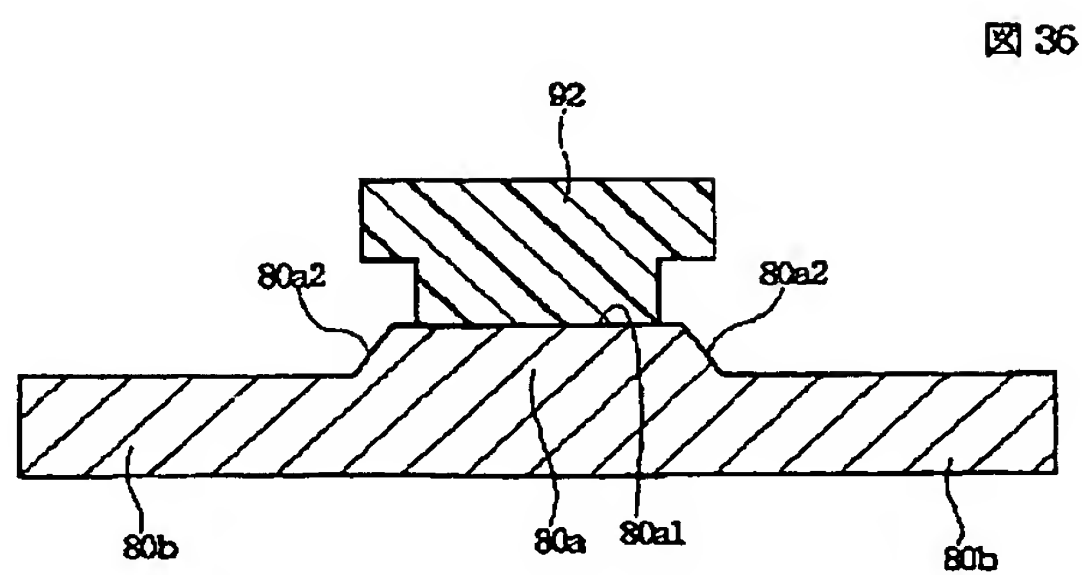
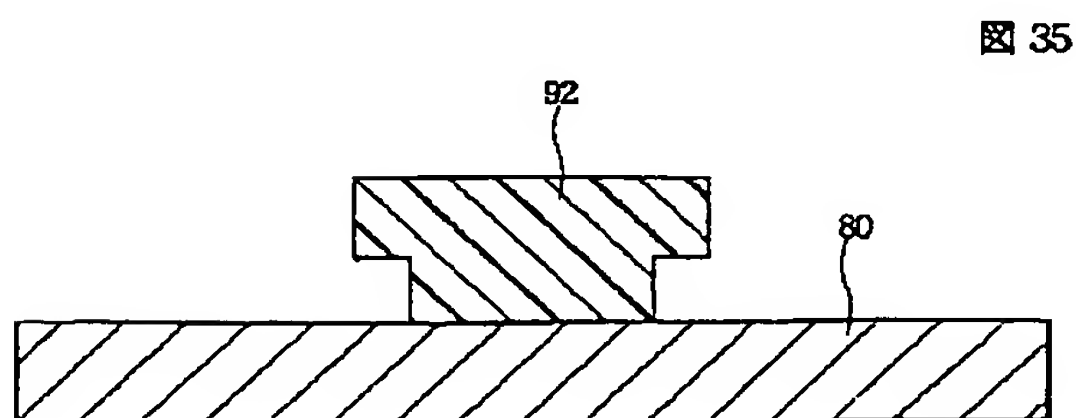


【図 15】



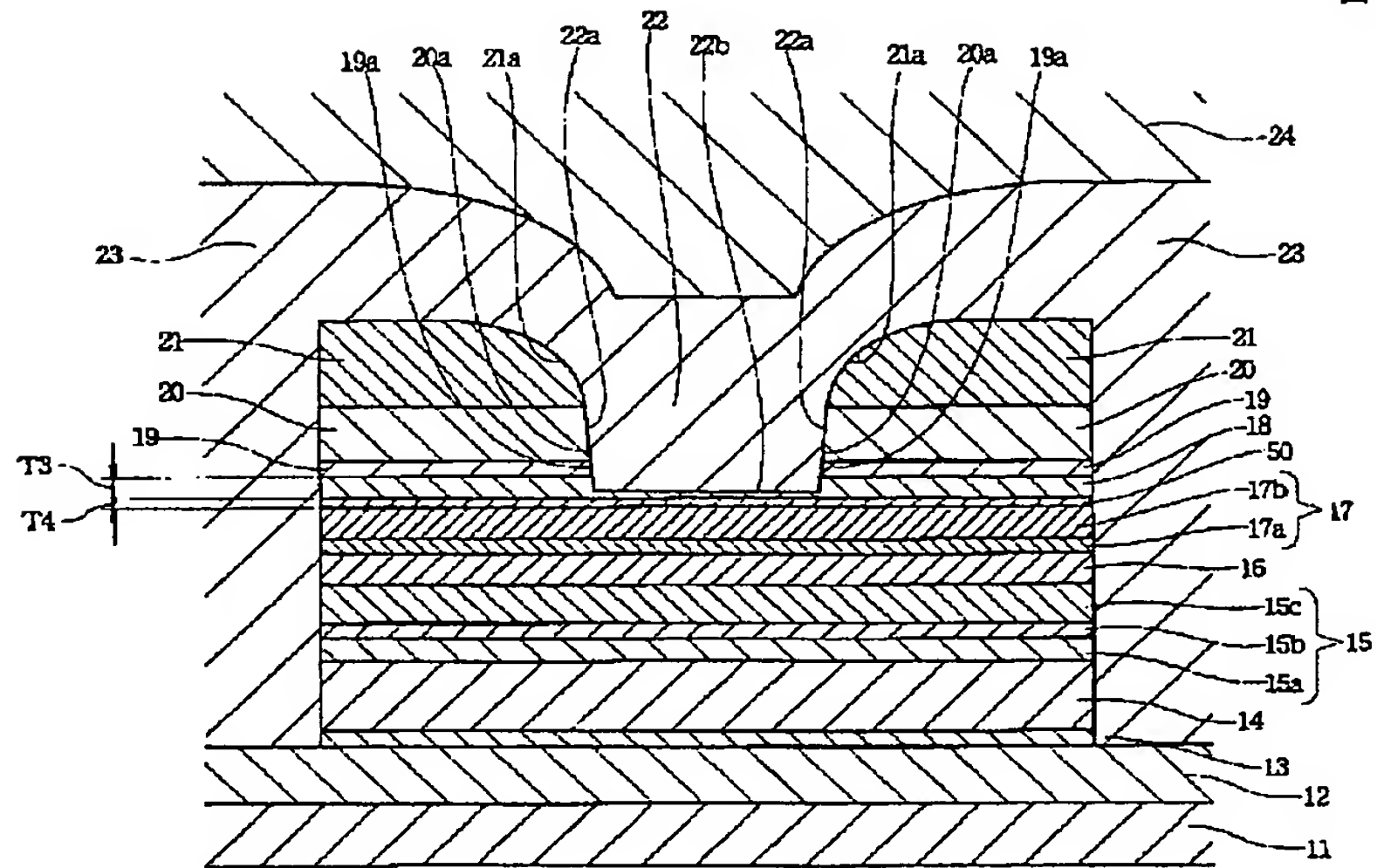
【図 35】

【図 3 6】



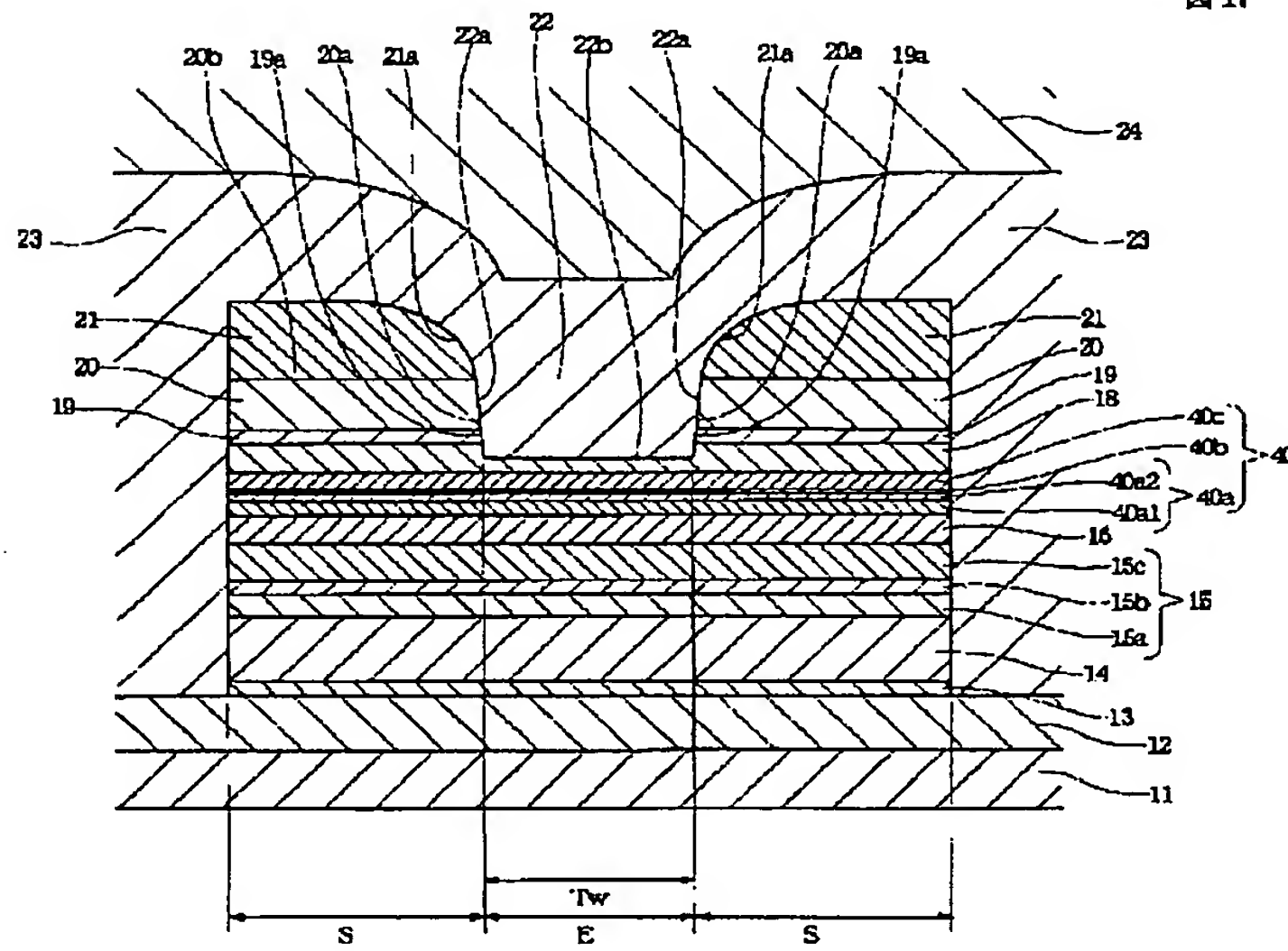
【図 16】

図 16



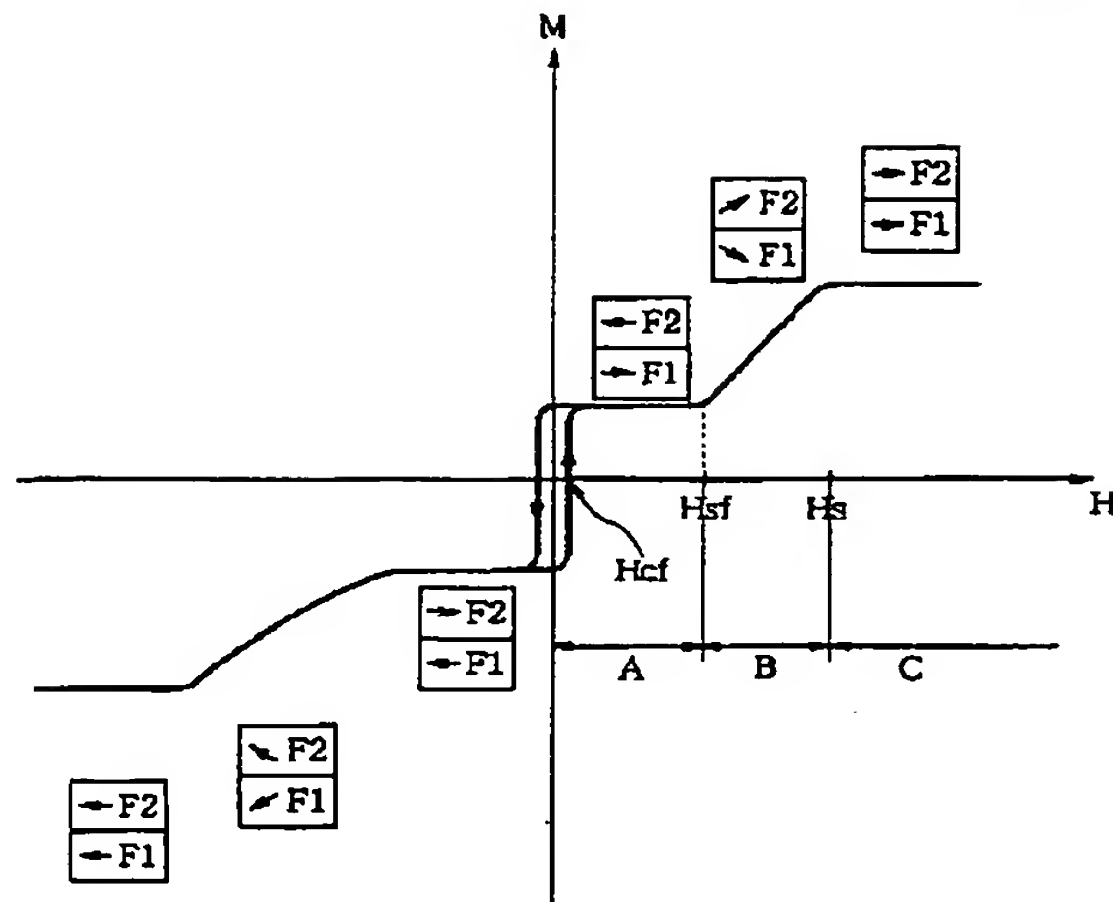
【図 17】

図 17



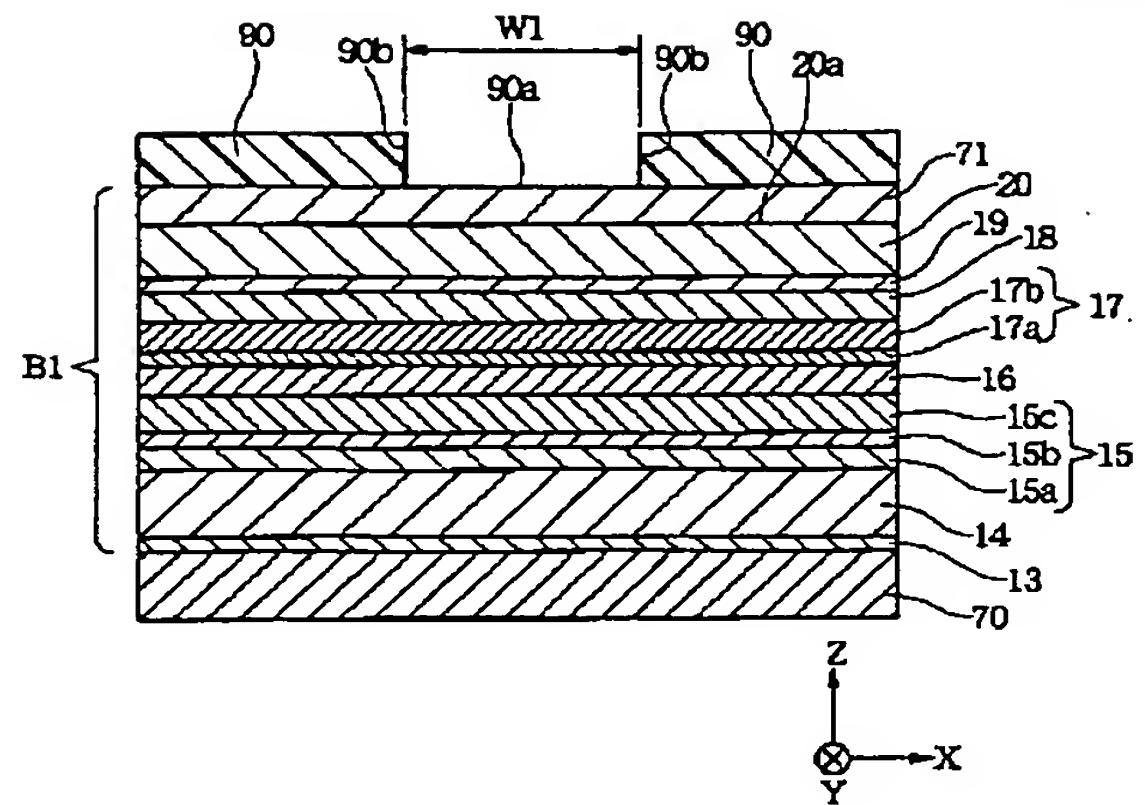
【図 18】

図 18



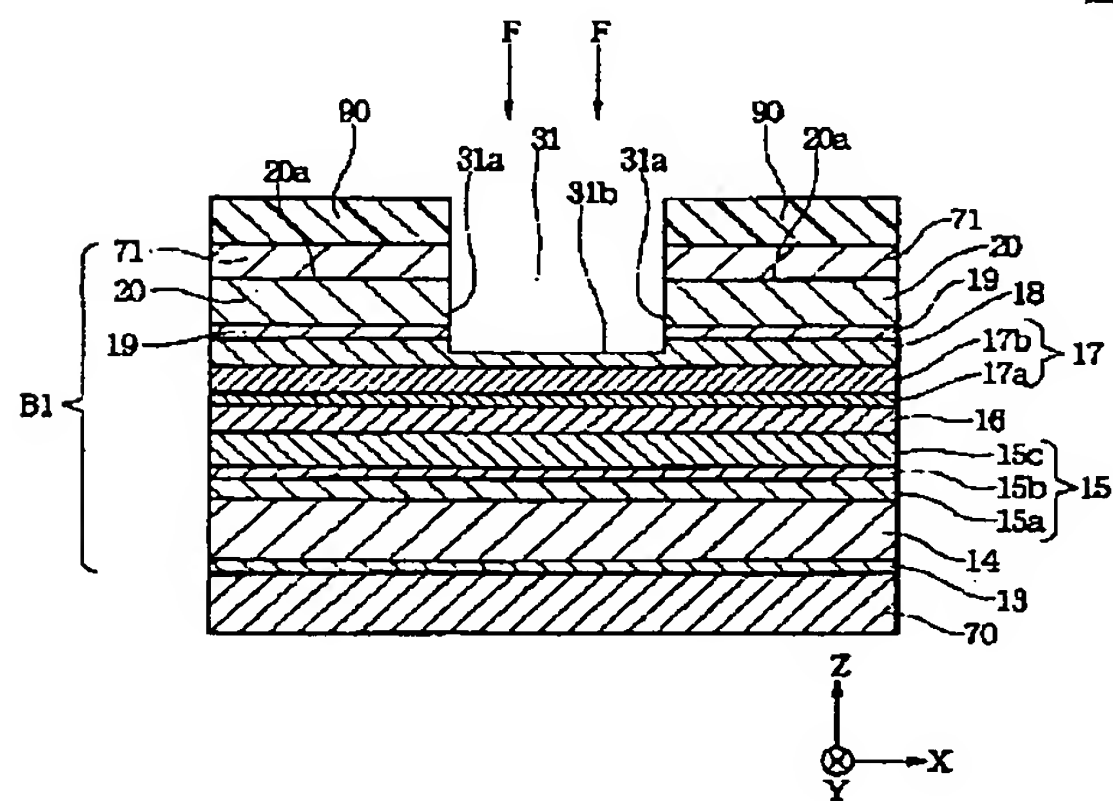
【図 23】

図 23



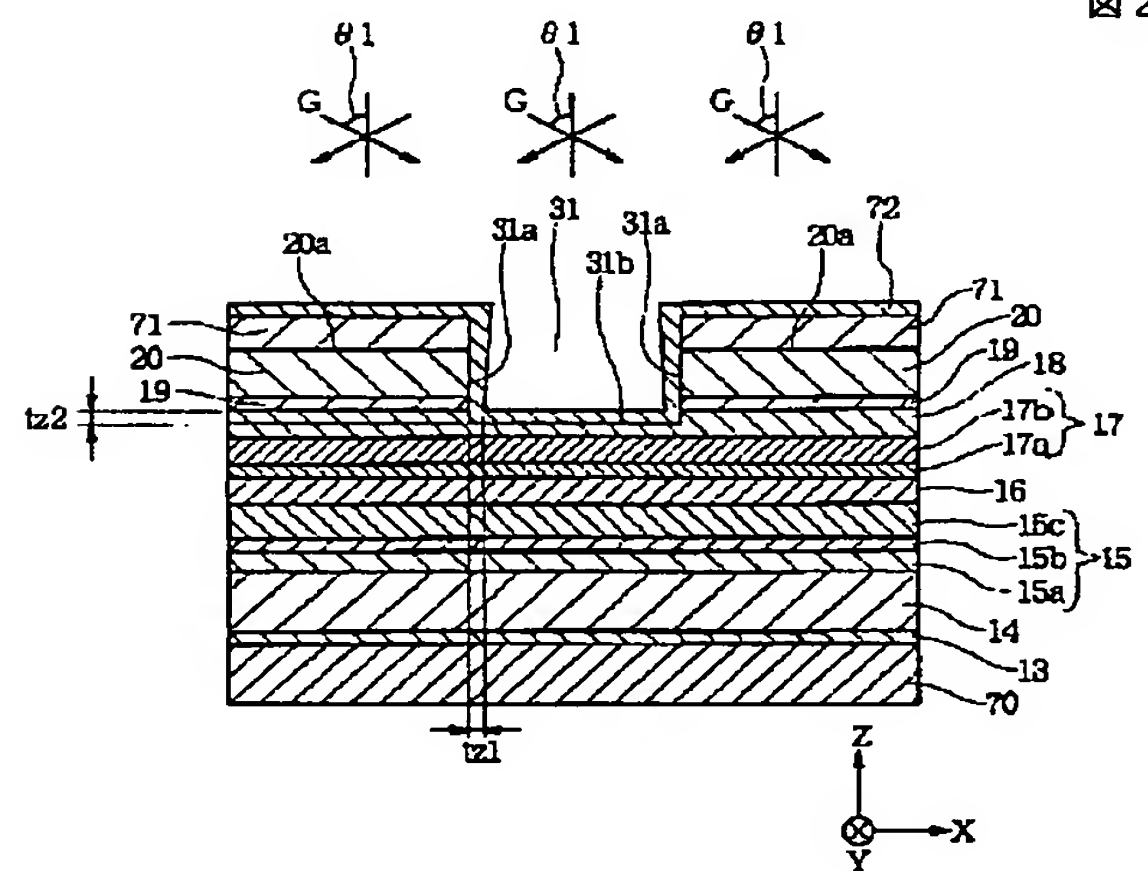
【図 24】

図 24



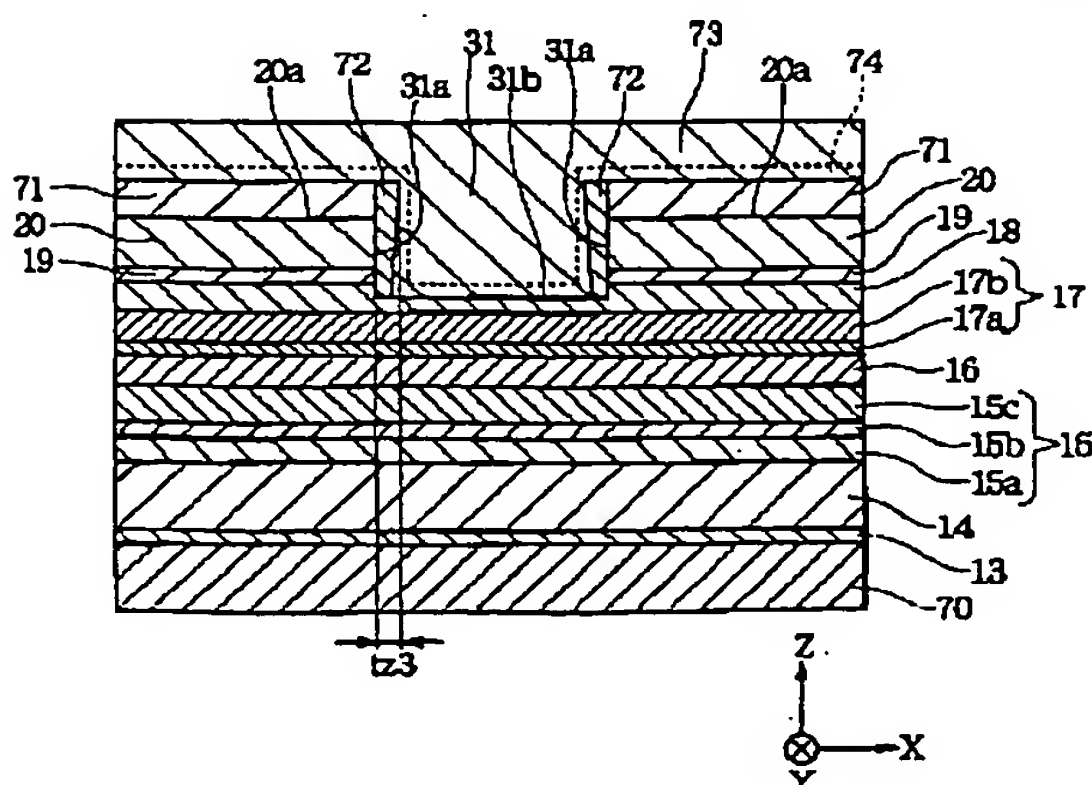
【図 25】

図 25



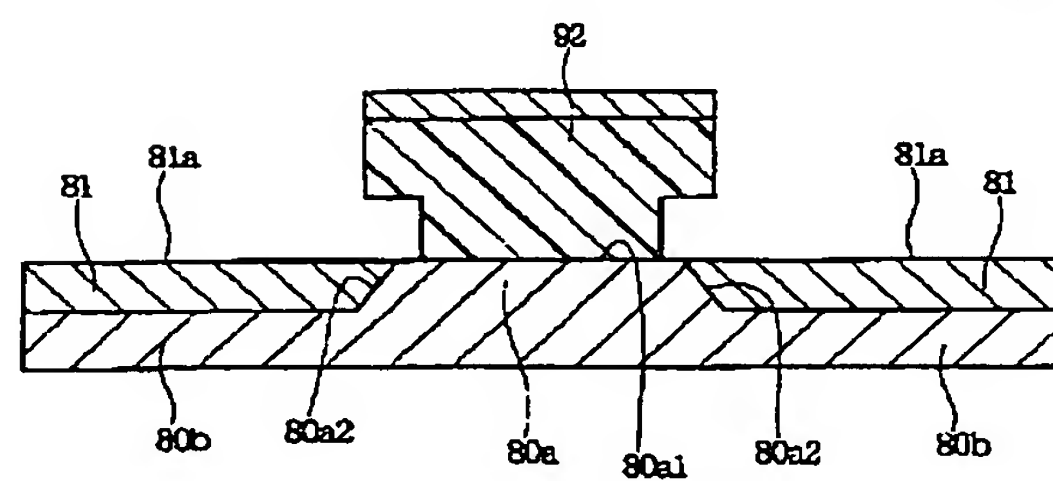
【図 27】

図 27



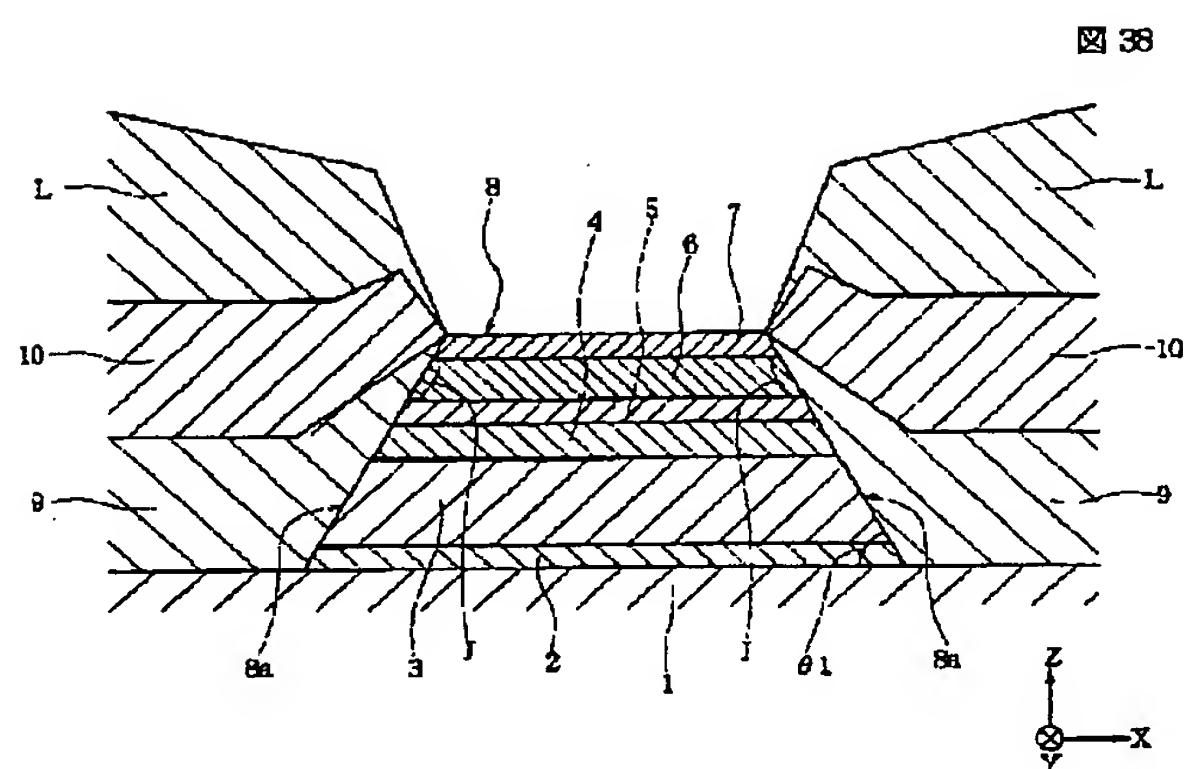
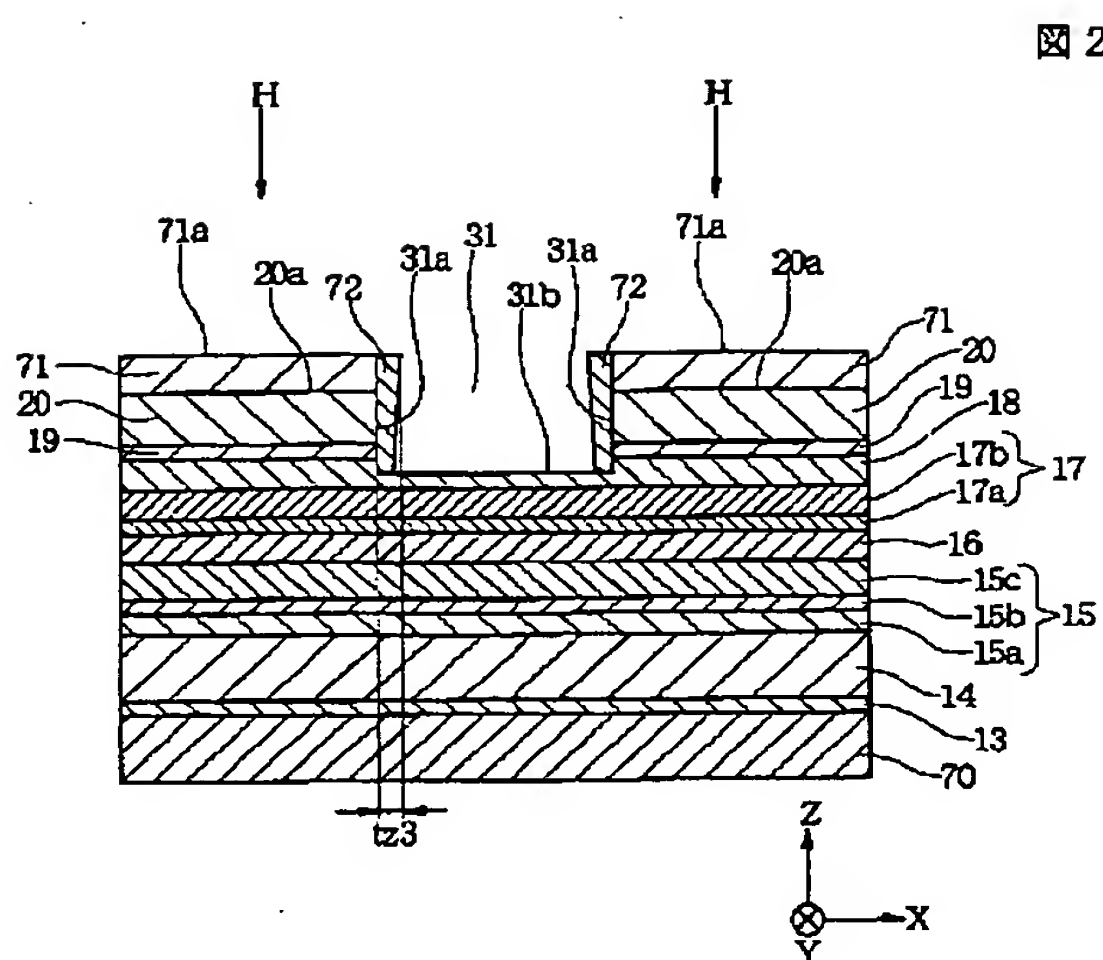
【図 37】

図 37



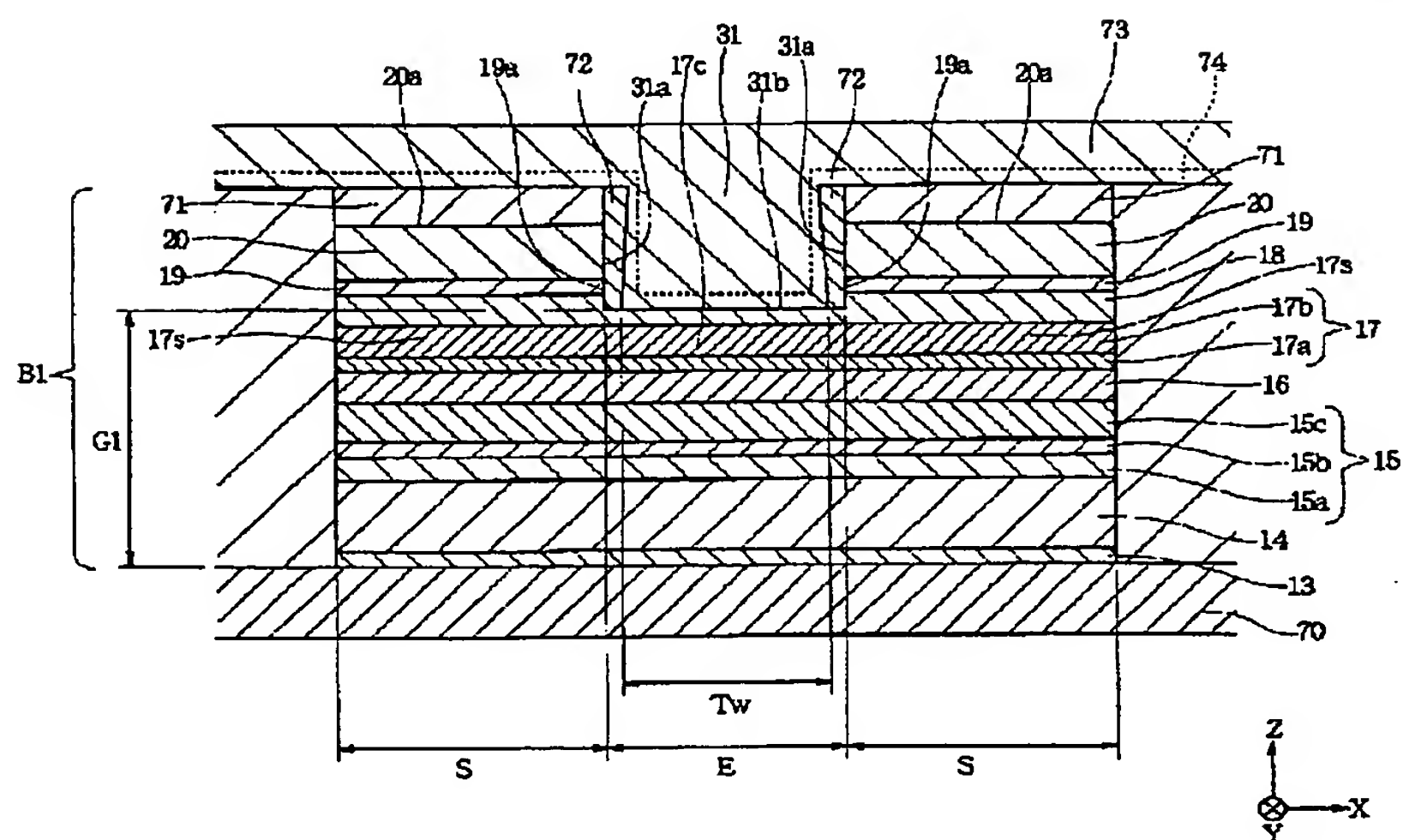
【図 26】

【図 38】



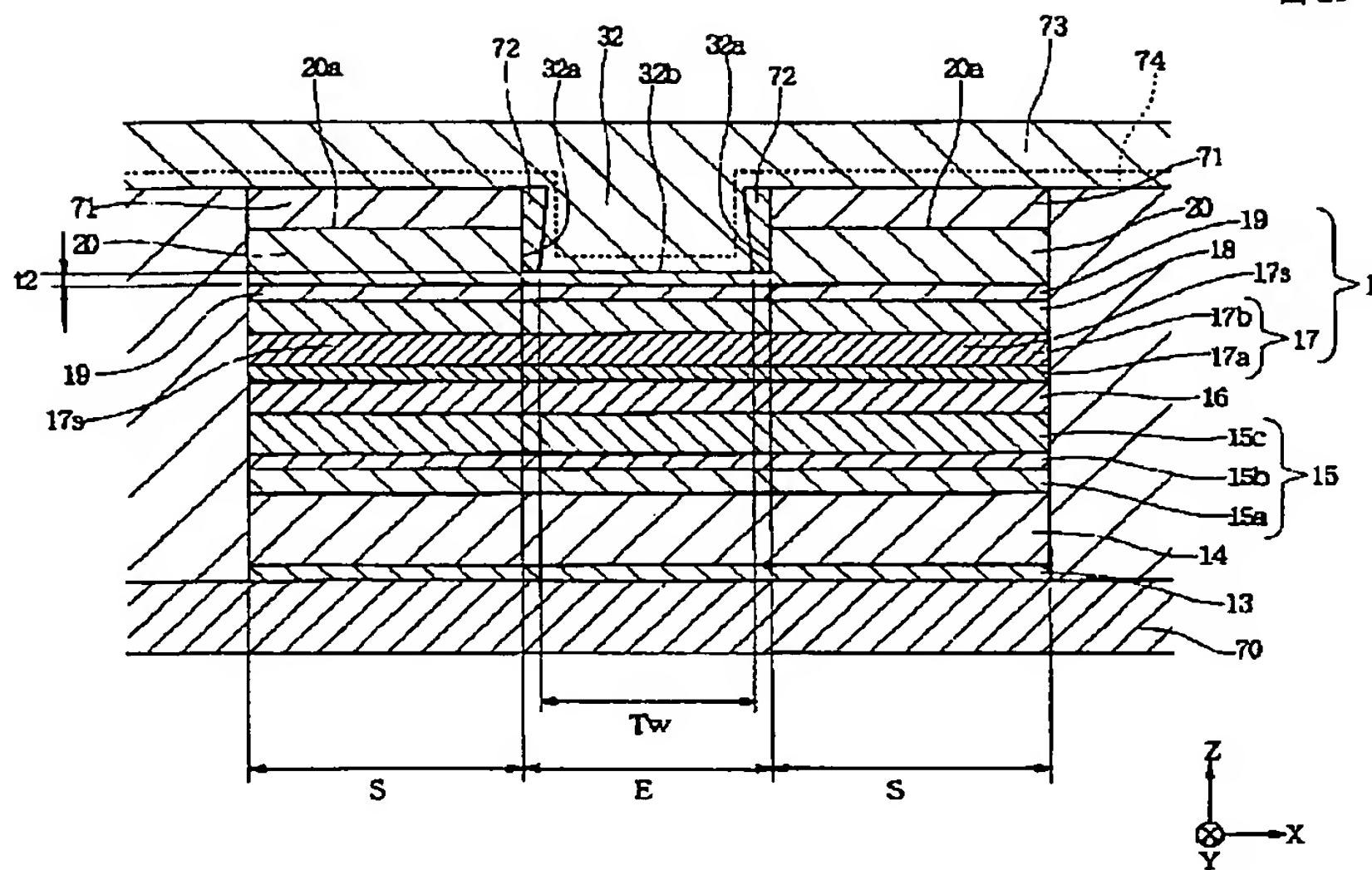
【図 28】

図 28



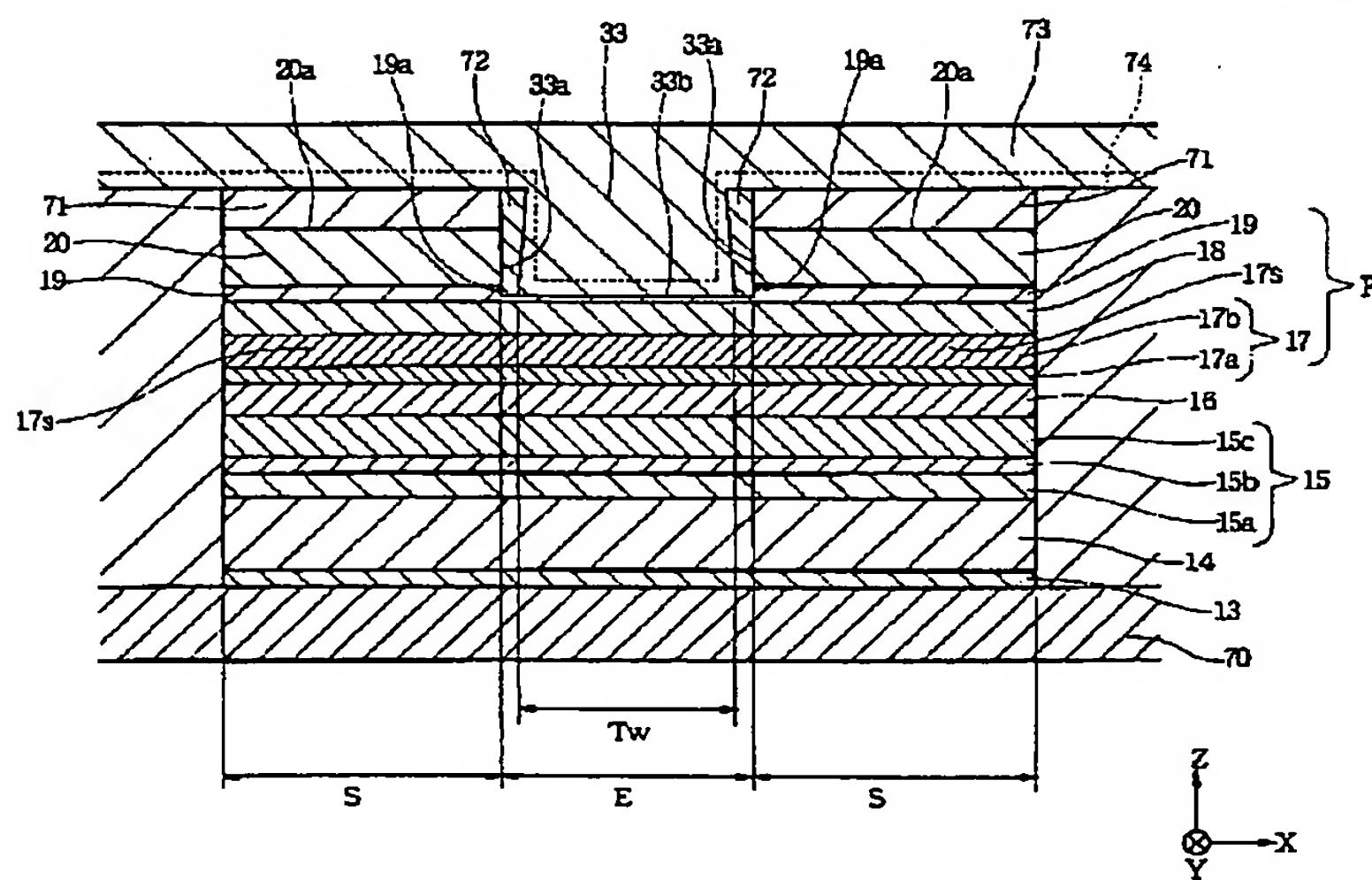
【図 29】

図 29



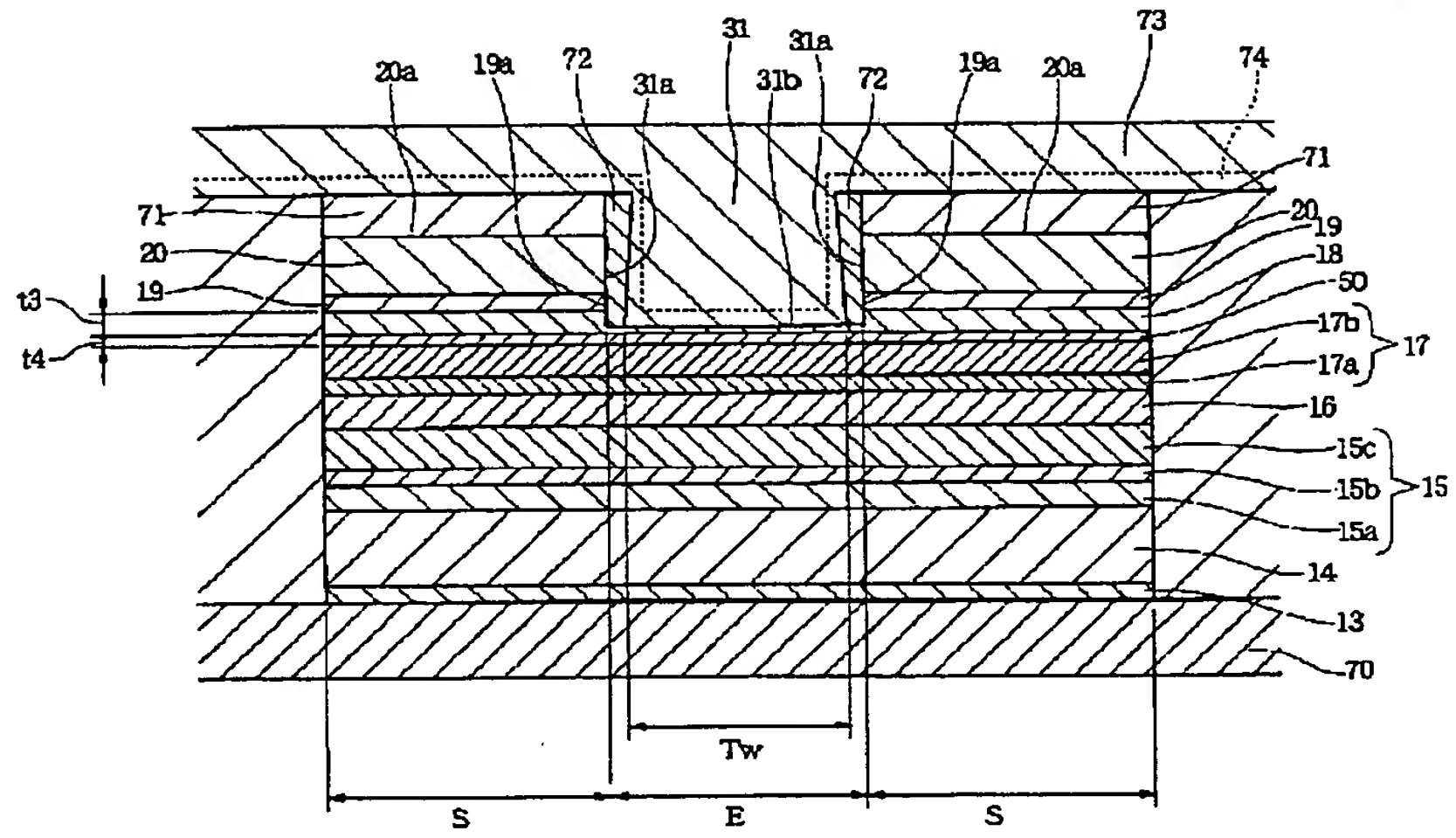
【図 30】

図 30



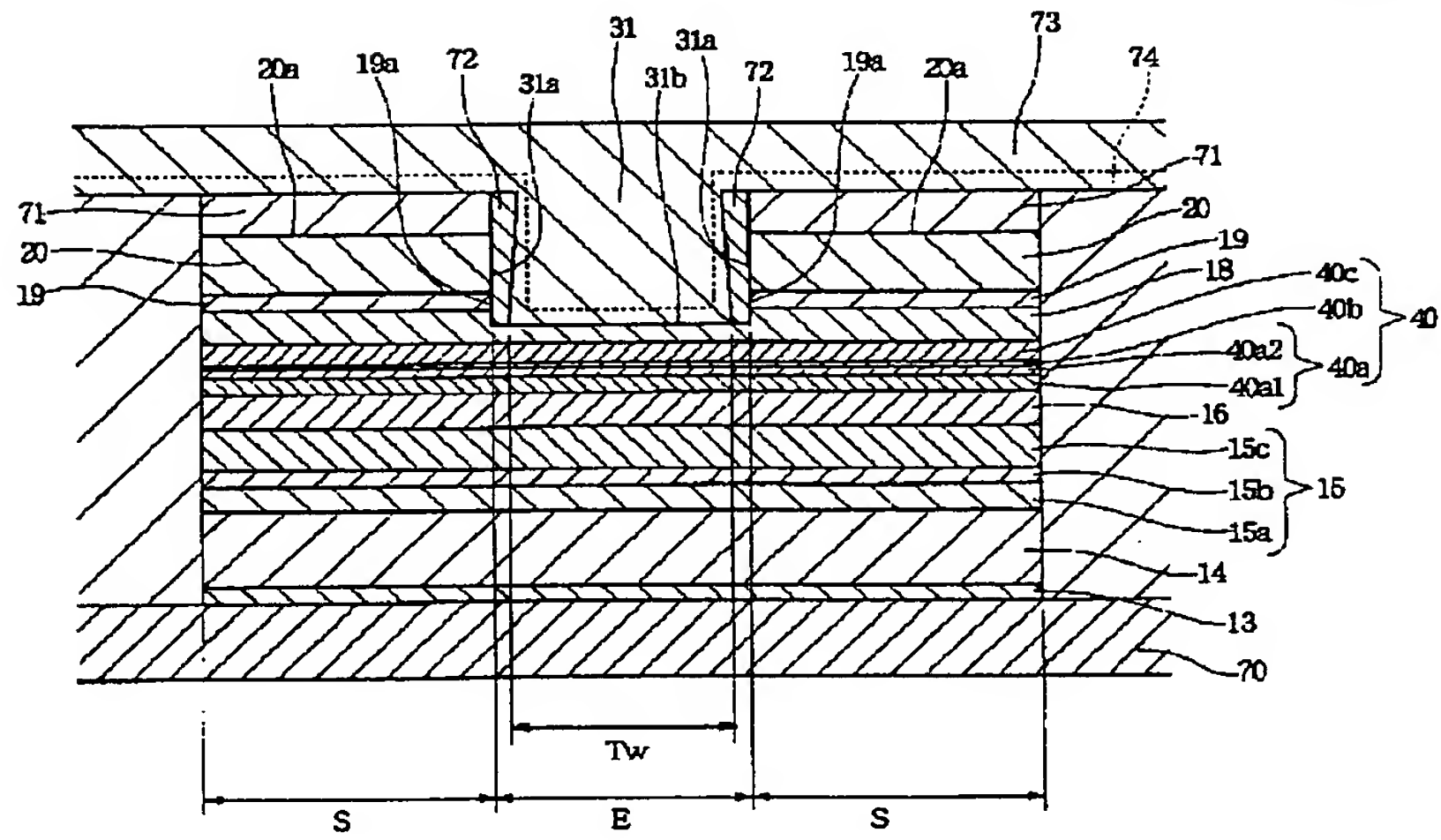
【図 31】

図 31



【図 32】

図 32



F ターム(参考) 2G017 AA01 AD55 AD65
5D034 BA03 CA08 DA07
5E049 AA04 AC05 BA16 DB12 EB01
EB06

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

THIS PAGE BLANK (USPTO)